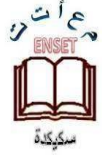




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي بسكيكدة

قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة ميكانيكية

مذكرة تخرج لنيل شهادة أستاذ تعليم ثانوي
بعنوان:

مقارنة بين منهجية تاغوشي بوكس-بنكن و تصميم المركب
المركزي في دراسة تأثير شروط القطع على خراطة الألمنيوم

من إحداد:

- لغريبه كلثوم
- مدوس لمياء

تحت إشرافه الأستاذة:

- بوهالي ريمة

لجنة المناقشة:

- | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| • د. لعداسي نوري | أستاذ محاضر - أ - رئيسا | م.ع.أ.ت.ت.ت.سكيكدة |
| • د. بوهالي ريمة | أستاذ محاضر - أ - مشرفا | م.ع.أ.ت.ت.ت.سكيكدة |
| • د. مريمش إيمان | أستاذ محاضر - ب - ممتحنا | م.ع.أ.ت.ت.ت.سكيكدة |
| • د. بوشلاغم هجيرة | أستاذ محاضر - ب - مناقشا | جامعة 08 ماي 1945 قالمة |

السنة الجامعية: 2025/2024

شكر وتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تنيسر السبل وتُدرَك الغايات. وبعد رحلةٍ من العمل الجاد والبحث المستمر، نتقدّم بخالص الشكر والامتنان لكل من أسهم في إخراج هذا العمل إلى النور.

نتوجّه ببالغ الشكر وعظيم التقدير إلى أستاذتنا المشرفة الفاضلة بوهالي ريمة، لما قدمته لنا من دعم وتوجيه، ولما أبدته من صبرٍ ومتابعةٍ دقيقة، كانت سبباً رئيساً في إتمام هذا العمل بالشكل الذي هو عليه اليوم. فجزاها الله عنا خير الجزاء، وبارك لها في علمها وجهدها.

كما نتقدّم بجزيل الشكر والاحترام إلى الأستاذ لعداسي نوري على قبوله الإشراف على جلسة المناقشة، ونخص بالشكر أيضاً الأستاذة المناقشة مريمش إيمان، على ما تفضلت به من قراءة متأنية، وملاحظات قيّمة أغنت هذا البحث. كما لا يفوتنا أن نعبر عن امتناننا الخالص لكل أساتذتنا الذين كان لهم دور في تكويننا المعرفي والمنهجي طيلة سنوات الدراسة.

نسأل الله أن يتقبل هذا العمل بقبول حسن، وأن يكتبه في ميزان حسناتنا ويجعله من صالح أعمالنا.

إهداء

الحمدُ لله الذي خلق الحروف، وألهم القلوب، ومدّنا بصيرٍ يسعُ الطريق. الحمد لله، الذي يُمهّد للروح مساراتها، ويُبارك خطواتها إن أخلصت. وما هذا العمل إلا غرسٌ صغير في أرضٍ وسعتها الدعوات، وسقاها اليقين.

إلى نفسي...

إلى ذلك القلب الذي صبر، والعقل الذي أصرّ، والروح التي لم تستسلم... إليك يا أنا، حين شعرت بالوحدة ولم تيأس، حين هبطت ولم تتخلّي عن النهوض.

إلى أول الحُب، وأصدق الأوطان...

إلى أمي، التي ما فارقتني ظلّها وإن ابتعدت، يا أول الدفاء، وآخر ملاذٍ حين تشتدّ الأيام. أنتِ لا تشبهين "الأمهات" كما يُكتب عنهن، أنتِ استثناء، أنتِ نفسُ الله الذي يربّت على كتفي حين تنكسر الجبال.

وإلى أبي...

الرجل الذي لم يقل الكثير... لكنه فعل ما لا يُقال. كنت ظلّاً طويلاً يستر خوفي، وصمتاً حكيمًا يُعلّمني أن الوقار لا يحتاج شرحاً. أنتِ لست صورةً على الجدار، أنتِ الطمانينة في قلبي حين لا يُجدي شيء.

إلى أخي وأخواتي...

أنتم الامتداد الأجل لأمان البيت... كنتم الحائط حين اختفت الجدران، والضحكة التي تُرمم الشقوق.

وإلى روح جدتي...

التي غادرت الجسد، وبقيت في القلب كما تُعِم الأنبياء في السطور. رحلت، لكن رائحتك ما زالت عالقة في تفاصيل الدعاء. إلى ذاك الظلّ الصامت...

إلى ظلٍ لم يكن كثيفاً، لكنه كان كافياً لأمضي... لم يُعلن وجوده، لكنه كان هناك في كل مرة تاهت فيها خطواتي شكراً لأنك كنت، بطريقتك...

إلى صديقة العمر...

يا من كان وجودك مرفأً لأفكاري، وامتداداً لصمتي. شكراً لأنك لم تكوني مجرد عابرة، بل أثراً، وظلاً، وصوتاً لا يُنسى.

إلى صديقتين لا تعرفهما الأضواء...

لكما حضورٌ هادئ... لكنه عميق كالبحر. أتركما لا يزول.

إلى زميلتي في المذكرة...

لك جزيل الشكر على كل لحظة تعاون ومشاركة.

إلى كلّ من مرّ، همس، ساند، أو دعا بخير...

اللهم اجعلهم في حفظك، وارزق أرواح من رحلوا من نورك ما لا يُطفأ، وأدم على من بقي منهم نعمتك، وبلّغهم من الرضا ما يُدهش قلوبهم.

إهداء

في لحظة كهذه، تقف الكلمات على أطراف اللسان، وتتزاحم المشاعر في القلب... لحظة ختام رحلة لم تكن سهلة، لكنها كانت مليئة بالدموع، والانتصارات الصغيرة التي صنعت النهاية الكبيرة.

أهدي هذا العمل المتواضع، المغموس بالكدّ والسهر، إلى أولئك الذين كانوا النور في عتمة الطريق.

إلى أمي الحبيبة، يا من خبأت قلبي في دعائك، ومسحت وجعي بكفك، يا من كنتِ الحنان حين ضاق صدري، والعين التي لا تنام خشيةً عليّ، لولاكِ، لما كنتُ ما أنا عليه... لكِ هذا التتويج، ولرضاكِ أنحني امتناناً. وكل الفضل بعد الله.

إلى أبي العزيز، سندي وسري، من علمني أن الكرامة لا تُشتري، وأن العزّ في العلم والعمل، لم أكن بحاجة إلى كلماتك، فقد كنتَ الحضور الثابت، والثقة التي لا تهتز... لكِ كل فخرٍ أحمله اليوم، فهو امتداد لك. شكراً لأنك كنتَ السند وقت الحاجة، والقوة دون كلام.

إلى إخوتي وأخواتي، من كانوا ضحكتي حين غاب الفرح، وسندي حين مالت الأيام، أنتم العائلة التي أفخر بها، والضلع التي اتكأتُ عليها في كل انكسار.

إلى أساتذتي الذين فتحوا لنا أبواب الفهم، وكانوا منارات على طريق التكوين... شكراً لكل جهدٍ بذلتموه، ولكل كلمةٍ أيقظت فينا الشغف.

إلى زميلاتي وزملائي، كل من كان جزءاً من هذه الرحلة... وضحكنا رغم التعب، لكم كل الاحترام على الصبر، وعلى الصداقة التي نشأت في رحاب التحديات. أخص بالذكر رفيقة روعي ندى وصديقاتي خولة ابتسام وفاء وغيرهم من الرفيقات بدون ان أنسى رفيقتي في المذكرة كلثوم.

إلى كل من آمن بي، حتى في لحظاتي التي شككتُ فيها بنفسي، أقول: هذا الإنجاز لا يُكتب باسمي فقط، بل باسمكم أيضاً. وأخيراً... إلى نفسي، التي صبرت، وثابرت، ووقفت من جديد في كل مرة تعثرت... أنا فخورة بك.

الحمد لله عدد ما تهجد ساجد، وعدد ما رفعت الأيدي شكراً... فبنعمته تتم الصالحات.

المخلص:

في هذا العمل البحثي، تم دراسة تأثير شروط القطع (سرعة القطع، عمق القطع، والتغذية) على كل من خشونة السطح ودرجة حرارة القطع أثناء عملية الخراطة الطولية لمادة الألمنيوم، باعتبارها من المواد واسعة الاستخدام في تطبيقات التصنيع الميكانيكي. تهدف هذه الدراسة إلى فهم كيفية تأثير هذه الشروط التشغيلية على جودة السطح والسلوك الحراري للعملية، لما لذلك من أهمية كبيرة في تحسين دقة التصنيع، رفع كفاءة الأداء، وتقليل التآكل الحراري للأداة. تُعد خشونة السطح مؤشراً مباشراً لجودة المنتج، في حين أن ارتفاع درجة حرارة القطع يؤثر سلباً على عمر الأداة وسلامة الأبعاد.

في هذا العمل تم انجاز تجارب مخبرية باستخدام مخرطة نصف آلية، حيث جرى تنظيم التجارب وتصميمها بالاعتماد على ثلاث منهجيات تجريبية: طريقة تاغوتشي، ومنهجية بوكس-بنكن، وتصميم المركب المركزي (Central Composite Design CCD)، وذلك بهدف مقارنة قدرة هذه الطرق على تحليل النتائج وتحديد الشروط المثلى للعملية. كما استُخدمت أدوات تحليل إحصائي مثل تحليل التباين (ANOVA) وتحليل الانحدار لبناء نماذج رياضية دقيقة تعبر عن العلاقة بين المتغيرات المدروسة والاستجابات المستهدفة، بالإضافة الى استعمال دالة الرغبة من أجل تحسين الاستجابة وذلك من خلال تحديد شروط القطع المثلى. تم تطبيق هذه الطرق بالاستعانة ببرنامج Design Expert و Minitab. تساعد نتائج هذا البحث في تحديد العوامل الأكثر تأثيراً في جودة التصنيع وظروف التشغيل المثلى التي تسمح بتحسين الاستجابة وبالتالي الحصول على سطح أقل خشونة، وتقليل درجة حرارة القطع، مما ينعكس إيجاباً على رفع الإنتاجية وخفض تكاليف التصنيع وتحسين عمر أداة القطع.

كلمات مفتاحية: شروط القطع، خشونة السطح، طريقة تاغوتشي، منهجية بوكس-بنكن، تصميم المركب المركزي.

Résumé

Dans ce travail de recherche, l'effet des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et l'avance) sur la rugosité de surface et la température de coupe a été étudié lors de la processus de tournage longitudinal de l'aluminium, un matériau largement utilisé dans les applications de fabrication mécanique. L'objectif principal est de comprendre comment ces paramètres influencent la qualité de surface et le comportement thermique du processus, ce qui est essentiel pour améliorer la précision de fabrication, augmenter l'efficacité opérationnelle et réduire l'usure thermique de l'outil. La rugosité de surface est un indicateur direct de la qualité du produit, tandis qu'une température de coupe élevée a un impact négatif sur la durée de vie de l'outil et la stabilité dimensionnelle.

Dans ce travail, les essais expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'un tour semi-automatique, en s'appuyant sur trois méthodologies expérimentales : la méthode Taguchi, la méthode RSM avec un plan Box-Behnken, et le plan de composite central (CCD). L'objectif était de comparer la capacité de ces approches à analyser les résultats et à identifier les conditions optimales du procédé. Des outils d'analyse statistiques tels que l'analyse de la variance (ANOVA) et l'analyse de régression ont été utilisés pour construire des modèles mathématiques précis décrivant la relation entre les variables d'entrée et les réponses ciblées. De plus, la Fonction de Désirabilité (DF) a été employée pour optimiser la réponse en identifiant les conditions de coupe optimales. Ces méthodes ont été appliquées à l'aide des logiciels Design Expert et Minitab. Les résultats obtenus permettent d'identifier les facteurs ayant le plus d'impact sur la qualité de fabrication et de définir des conditions de coupe optimales, permettant d'améliorer la réponse, ce qui se traduit par une réduction de la rugosité de surface, une diminution de la température de coupe, tout en augmentant la productivité, en réduisant les coûts de production et en prolongeant la durée de vie de l'outil.

Mot clés : Conditions de coupe, rugosité de surface, méthode de Taguchi, Méthode Box-Behnken, CCD.

Abstract

In this research work, the effect of cutting parameters—namely cutting speed, depth of cut, and feed rate—on both surface roughness and cutting temperature was investigated during the longitudinal turning of aluminum, a material widely used in mechanical manufacturing applications. The study aims to understand how these operational parameters influence surface quality and thermal behavior of the process, which is crucial for improving machining accuracy, enhancing performance efficiency, and reducing thermal wear of the cutting tool. Surface roughness is considered a direct indicator of product quality, while high cutting temperature negatively affects tool life and dimensional accuracy.

In this work, the experimental trials were conducted using a semi-automatic lathe. The experimental were designed based on three methodologies: the Taguchi method, the Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD), and the Box-Behnken Design. The aim was to compare the ability of these approaches to were used to compare their effectiveness in analyze the results and determine the optimal cutting conditions. Statistical analysis tools such as Analysis of Variance (ANOVA) and regression analysis were employed to develop accurate mathematical models that describe the relationship between the input variables and the target responses. Additionally, the Desirability Function (DF) was employed to optimize the response by identifying the optimal cutting conditions. These methods were implemented using Design Expert and Minitab software. The results of this study help identify the most influential factors affecting manufacturing quality and determine the optimal operating conditions that enhance the response, leading to reduced surface roughness, lower cutting temperature, ultimately enhancing productivity, reduced manufacturing costs, and improving tool life.

Keyword: Cutting Conditions, surface roughness, Taguchi method, Box-behnken design, CCD.

الفهرس

فهرس الأشكال

فهرس الجداول

قائمة الرموز

الفصل الأول: الخراطة

- 1 مقدمة عامة: 1
- 3 1.1 مقدمة: 3
- 3 2.1 تعريف الخراطة: 3
- 4 3.1 عمليات الخراطة: 4
- 5 4.1 المخارط: 5
- 5 1.4.1 تعريف المخرطة: 5
- 5 2.4.1 المخرطة النصف آلية: 5
- 6 5.1 أقلام الخراطة: 6
- 6 1.5.1 أجزاء أقلام الخراطة: 6
- 7 6.1 أدوات القطع: 7
- 7 1.6.1 العوامل المتحكممة في تصنيع أدوات القطع: 7
- 8 2.6.1 أنواع أدوات القطع: 8
- 9 7.1 الحركة النسبية (أداة/قطعة) في عملية الخراطة: 9
- 9 1.7.1 حركة القطع: 9
- 9 2.7.1 حركة التغذية: 9
- 10 3.7.1 حركة الاختراق: 10
- 10 8.1 شروط القطع: 10
- 10 1.8.1 سرعة القطع V_c : 10
- 10 2.8.1 سرعة التغذية V_f : 10
- 10 3.8.1 عمق القطع a_p : 10

10.....	9.1 وصف خشونة السطح:
11.....	1.9.1 تعريف خشونة السطح:
11.....	2.9.1 أنواع الأسطح:
11.....	3.9.1 تصنيف عدم استواء الأسطح:
12.....	4.9.1 مقاييس الخشونة:
14.....	10.1 خاتمة:

الفصل الثاني: طرق تصميم التجارب وتحليل النتائج

15.....	1.2 مقدمة:
15.....	2.2 طرق تصميم التجارب:
15.....	1.2.2 طريقة تاغوشي:
16.....	2.2.2 منهجية سطح الاستجابة RSM:
19.....	3.2.2 طريقة Box-Behnken:
21.....	4.2.2 تصميم المركب المركزي:
24.....	3.2 طرق تحليل النتائج:
24.....	1.3.2 نسبة الإشارة إلى الضوضاء (signal/noise ratio):
25.....	2.3.2 تحليل التباين (ANOVA):
26.....	3.3.2 تحليل الانحدار:
28.....	4.3.2 تحسين الاستجابة:
30.....	4.2 خاتمة:

الفصل الثالث: الجزء التجريبي

31.....	1.3 مقدمة:
31.....	2.3 عينات الاختبار:
31.....	1.2.3 خصائص مادة الصنع:
32.....	3.3 الوسائل المستعملة:
32.....	1.3.3 آلة الخراطة المستعملة:

34.....	أدوات القطع:	2.3.3
35.....	لقم الأدوات:	3.3.3
35.....	جهاز قياس الخشونة:	4.3.3
36.....	جهاز قياس الحرارة:	5.3.3
37.....	تحضير العينة:	4.3
38.....	عمليات القياس:	5.3
38.....	عمليات قياس درجة الحرارة:	1.5.3
39.....	عملية قياس الخشونة:	2.5.3
40.....	خاتمة:	6.3

الفصل الرابع: نتائج وتحليل

41.....	مقدمة:	1.4
41.....	وصف التجربة:	2.4
41.....	تطبيق تصميم Taguchi:	3.4
42.....	تحليل النتائج الخاصة بخشونة السطح (Ra):	1.3.4
44.....	تحليل النتائج الخاصة بدرجة حرارة القطع (Tc):	2.3.4
46.....	تحسين الاستجابة Response Optimization:	3.3.4
47.....	تطبيق تصميم Box Behnken:	4.4
48.....	تحليل النتائج الخاصة بخشونة السطح (Ra):	1.4.4
50.....	تحليل النتائج الخاصة بدرجة حرارة القطع (Tc):	2.4.4
52.....	تحسين الاستجابة Response Optimization:	3.4.4
54.....	تطبيق منهجية تصميم المركب المركزي (CCD):	5.4
56.....	تحليل النتائج الخاصة بالخشونة (Ra):	1.5.4
58.....	تحليل النتائج الخاصة بدرجة الحرارة (Tc):	2.5.4
60.....	تحسين الاستجابة Response Optimization:	3.5.4
61.....	مقارنة بين تصميم Taguchi، تصميم Box Behnken وتصميم المركب المركزي (CCD):	6.4

62.....	خاتمة: 7.4
64.....	خاتمة عامة:
66.....	المراجع

فهرس الأشكال

الفصل الأول: الخراطة

- الشكل 1.1: عملية الخراطة 3
- الشكل 2.1: مخرطة نصف آلية. 5
- الشكل 3.1: أجزاء قلم الخراطة. 7
- الشكل 4.1: زوايا قلم الخراطة. 8
- الشكل 5.1: مختلف أدوات القطع الداخلية والخارجية. 8
- الشكل 6.1: حركات القطع. 9
- الشكل 7.1: الأشكال المختلفة لعدم استواء الأسطح. 11
- الشكل 8.1: حيود. 12
- الشكل 9.1: تموجات. 12
- الشكل 10.1: أخاديد. 12
- الشكل 11.1: حروز. 12
- الشكل 12.1: الخشونة المتوسطة. 13
- الشكل 13.1: عمق الخشونة. 13
- الشكل 14.1: عمق الاستواء. 13
- الشكل 15.1: متوسط اقصى انحرافات السطح. 14

الفصل الثاني: طرق تصميم التجارب وتحليل النتائج

- الشكل 1.2: منهجية البحث. 16
- الشكل 2.2: رسم توضيحي لخطة Box-Behnken لثلاث عوامل. 20
- الشكل 3.2: تصميم مركب مركزي لعدد العوامل $k=2$ وقيمة $a=\sqrt{2}$ 23
- الشكل 4.2: تصميم مركب مركزي لعدد العوامل $k=3$ وقيمة $a=\sqrt{3}$ 23

الفصل الثالث: الجزء التجريبي

- الشكل 1.3: عينات الاختبار. 31
- الشكل 2.3: مخرطة نصف آلية. 32

- الشكل 3.3: مقبض اختيار سرعة الدوران. 33.....
- الشكل 4.3: لوحة التحكم. 33.....
- الشكل 5.3: مقابض التحكم في سرعة التغذية. 33.....
- الشكل 6.3: جدول قيم التغذية. 34.....
- الشكل 7.3: أداة التعنيق. 34.....
- الشكل 8.3: أداة الخرط الطولي. 34.....
- الشكل 9.3: لقم التعنيق. 35.....
- الشكل 10.3: لقم الخرط الطولي. 35.....
- الشكل 11.3: مكونات جهاز قياس الخشونة. 36.....
- الشكل 12.3: كاميرا التقاط درجة الحرارة. 36.....
- الشكل 13.3: عملة قياس الطول. 37.....
- الشكل 14.3: عملية التعنيق. 38.....
- الشكل 15.3: عملية الخرط الطولي. 38.....
- الشكل 16.3: الشكل النهائي لعينة الاختبار. 38.....
- الشكل 17.3: عملية التحقق من صلاحية جهاز قياس الخشونة. 39.....
- الشكل 18.3: طريقة تموضع الجهاز الصحيحة. 40.....
- الشكل 19.3: عملية قياس الخشونة. 40.....

الفصل الرابع: نتائج وتحليل

- الشكل 1.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 44.....
- الشكل 2.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 46.....
- الشكل 3.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra). 47.....
- الشكل 4.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc). 47.....
- الشكل 5.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 50.....
- الشكل 6.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 52.....
- الشكل 7.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra). 53.....
- الشكل 8.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc). 54.....

- الشكل 9.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.....57
- الشكل 10.4: مخطط مدى توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.....59
- الشكل 11.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra) 60
- الشكل 12.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc) 61

فهرس الجداول

الفصل الأول: الخراطة

الجدول 1.1: عمليات الخراطة. 4

الجدول 2.1: مختلف أدوات القطع. 9

الفصل الثاني: طرق تصميم التجارب وتحليل النتائج

الجدول 1.2: جدول تصميم Box-Behnken لثلاثة عوامل. 20

الجدول 2.2: تمثيل مستويات المتغيرات في النقاط المحورية والعملية لتصميم المركب المركزي CCD. 22

الفصل الثالث: الجزء التجريبي

الجدول 1.3: الخصائص الكيميائية. 31

الجدول 2.3: الخصائص الفيزيائية. 32

الفصل الرابع: نتائج وتحليل

الجدول 1.4: شروط القطع ومستوياتها. 41

الجدول 2.4: تصميم التجارب بالاعتماد على منهجية تاغوشي ونتائج كل من Ra و Tc. 42

الجدول 3.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra). 43

الجدول 4.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 43

الجدول 5.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc). 45

الجدول 6.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 45

الجدول 7.4: تصميم التجارب وفق box-behnken ونتائج كل من Ra و Tc. 48

الجدول 8.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra). 49

الجدول 9.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 50

الجدول 10.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc). 51

الجدول 11.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 52

الجدول 12.4: : تصميم التجارب وفق CCD ونتائج كل من Ra و Tc. 55

الجدول 13.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra). 56

الجدول 14.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 57

الجدول 15.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc) 58

الجدول 16.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي. 59

قائمة الرموز

- Mc : حركة القطع.
- Ma : حركة التقدم.
- Mp : حركة الاختراق.
- Vc : سرعة القطع (m/min) .
- Vf : سرعة التغذية (mm/min) .
- ap : عمق القطع (mm) .
- f : التغذية (mm/tr) .
- N : سرعة دوران (tr/min) .
- D : القطر (mm) .
- γ : زاوية الجرف ($^{\circ}$) .
- α : زاوية الخلوص ($^{\circ}$) .
- β : زاوية السن ($^{\circ}$) .
- Rt : الخشونة الكلية (μm) .
- Rz : متوسط الخشونة الكلية (μm) .
- Ra : متوسط الخشونة الحسابي (μm) .
- Rp : عمق الاستواء (μm) .
- Rq : متوسط الجذع التريبي لانحرافات السطح (μm) .
- L : الطول الكلي (m) .
- y : متغير تابع.
- f : دالة الاستجابة.
- η : نموذج الاستجابة.
- σ : الانحراف المعياري.
- ξ : المتغير الطبيعي .
- e : يمثل خطأ التنبؤ.
- S/N : نسبة الإشارة الى الضوضاء (db) .
- N : عدد الحالات في المصفوفة المتعامدة.
- Yi : النتيجة التجريبية/العديدية للتجربة.

- SS_f : المجموع التربيعي.
- MS_i : المتوسط التربيعي
- MS_e : المجموع التربيعي للأخطاء.
- df_i : درجات الحرية
- SS_T : مجموع التباين الكلي.
- \bar{y} : متوسط الاستجابات.
- \bar{y}_i : متوسط الاستجابات المقاسة لكل مستوى i لعامل f .
- N : العدد الإجمالي للتجارب.
- N_{nf} : عدد مستويات كل عامل.
- %Con : مساهمة العوامل في التباين الكلي.
- β_1 : منحدر خط الانحدار.
- β_0 : نقطة التقاطع لخط الانحدار والمحور y .
- R^2 : معامل تحديد الانحدار المتعدد.

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

يُعدّ التصنيع إحدى الدعائم الأساسية في تطوير الأنظمة الصناعية الحديثة، حيث يُمثل حلقة الوصل بين التصميم الهندسي وتحقيق المنتج النهائي القابل للاستعمال. ومع تزايد متطلبات السوق من حيث الدقة والجودة، برزت الحاجة إلى تحسين تقنيات التصنيع من خلال إدماج مفاهيم الجودة والفعالية الاقتصادية والطاقوية في مختلف مراحل الإنتاج. وفي هذا السياق، تحظى عمليات التشغيل بالقطع بأهمية كبيرة، لا سيما خلال المراحل النهائية من التصنيع، لما لها من دور حاسم في تحديد الخصائص النهائية للمنتج، من حيث الشكل، الدقة الأبعادية، والخواص السطحية.

من بين هذه العمليات، تحتل الخراطة (Turning) مكانة متميزة نظراً لاستخدامها الواسع في تشكيل القطع المعدنية ذات الأشكال الأسطوانية بدقة عالية. وتعتمد جودة هذه العملية بشكل أساسي على عدد من العوامل التقنية، في مقدمتها الخشونة السطحية (Surface Roughness)، والتي تُعد مؤشراً رئيسياً على جودة السطح الناتج، نظراً لتأثيرها المباشر على الأداء الوظيفي للقطعة، مثل مقاومة التآكل والاحتكاك، كفاءة التجميع، والمتانة السطحية. كما تُعد درجة حرارة القطع عاملاً حيوياً في تحديد كفاءة التشغيل، إذ أن ارتفاعها قد يؤدي إلى تلف أداة القطع أو تغير في خصائص المادة المُشغلة.

وترتبط كل من الخشونة السطحية ودرجة الحرارة بشروط القطع (Cutting Parameters)، والتي تشمل: سرعة القطع، عمق القطع، والتغذية. غير أن تأثير هذه العوامل لا يكون فردياً أو خطياً دائماً، بل غالباً ما يظهر ضمن تفاعلات معقدة، تتطلب استخدام مناهج تحليلية دقيقة لدراستها وتحديد الشروط المثلى للتشغيل.

في هذا العمل تم تطبيق كل من طريقة تاغوشي (Taguchi Method) لما توفره من كفاءة في تصميم التجارب وتحسين الجودة بأقل عدد ممكن من التجارب. منهجية RSM Central Composite على نمذجة وتحليل العلاقات بين المتغيرات والتفاعلات المختلفة. وتصميم بوكس-بنكن (Box-Behnken Design) كونه يوفر توازناً جيداً بين عدد التجارب وجودة النتائج.

وقد تم تحليل النتائج باستخدام أدوات إحصائية مثل تحليل التباين (ANOVA) لاختبار دلالة المتغيرات، وتحليل الانحدار لتكوين نماذج رياضية للعلاقات، بالإضافة إلى دالة التحسين (Desirability Function) لتحسين الاستجابات.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير شروط القطع على كل من الخشونة السطحية المتوسطة ودرجة حرارة القطع. ومقارنة أداء كل من طريقة تاغوشي وتصميم المركب المركزي وتصميم بوكس-بنكن من حيث القدرة على التنبؤ وتحسين جودة التشغيل. ولهذا الغرض تم تنظيم هذه المذكرة وفق الفصول التالية:

الفصل الأول: يعرض المبادئ الأساسية لعملية الخراطة، أنواع المخارط، أدوات القطع، الحركات النسبية، شروط القطع، والعوامل المؤثرة على جودة السطح.

الفصل الثاني: يقدم عرضاً نظرياً لمنهجيات تصميم التجارب وتحليل النتائج، بما في ذلك طريقتا تاغوشي، تصميم بوكس-بنكن، و CCD ، إضافة إلى أدوات تحليل التباين والانحدار، ودالة الرغبة.

الفصل الثالث: يُعنى بتفصيل الجوانب التجريبية، مثل إعداد العينات، المعدات المستخدمة، وطرق القياس.

الفصل الرابع: يتناول تحليل البيانات التجريبية، ودراسة تأثير العوامل على الاستجابات، وتقييم الأداء الحراري والتنبؤ بجودة السطح، والمقارنة بين المنهجيات الثلاثة.

الفصل الأول:

الخرائط

1.1. مقدمة:

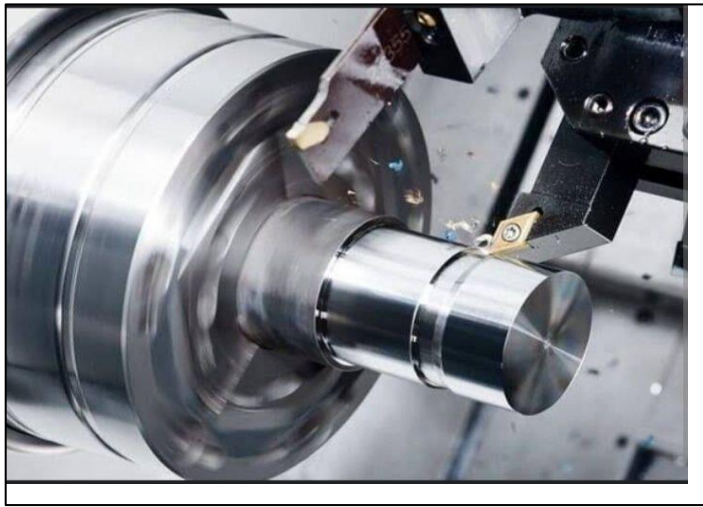
الحصول على الأشكال المطلوبة لقطعة معينة من خلال إزالة المادة لا يزال حتى اليوم من أكثر طرق التصنيع شيوعاً، على الرغم من التطورات الكبيرة في عمليات التصنيع الأخرى مثل: التشكيل والصب. تُستخدم عمليات التشغيل بنزع المادة على نطاق واسع في الصناعة، نظراً لقدرتها على إزالة كميات كبيرة من المادة في وقت قصير نسبياً، مما يتيح إنتاج قطع معقدة بأشكال دقيقة وتكلفة معقولة، مع قابلية تطبيقها على مجموعة متنوعة من المواد. تُعد عمليات التشغيل، مثل: الخراطة، التفريز، الكشط... الأكثر استخداماً في تشكيل المعادن في مجال الصناعة الميكانيكية.

يتمثل الهدف الأساسي من عمليات التصنيع في إنتاج منتجات بسرعة، وبطريقة اقتصادية، مع ضمان مستوى عالٍ من الجودة. هناك العديد من تقنيات التشغيل المتاحة وفي هذا الفصل سنتطرق بشكل خاص إلى عملية الخراطة.

2.1. تعريف الخراطة:

هي إحدى عمليات التشغيل التي يتم خلالها إزالة جزء من المادة الخام للحصول على الشكل النهائي المطلوب. تُستخدم هذه العملية لإزالة المادة غير المرغوب فيها، والمعروفة بالرائش، باستخدام أداة قطع خاصة (شكل 1.1). تُجرى هذه العملية على آلة تُسمى المخرطة، وتهدف إلى تشكيل أسطح دائرية أو شبه دائرية، سواء كانت داخلية أو خارجية، على قطع أسطوانية أو مخروطية الشكل. وتهدف عملية الخراطة إلى تحقيق أبعاد دقيقة وأشكال محددة للقطع، من أبرز هذه الأشكال الأعمدة، والأقراص، والأجزاء الدائرية، والسطوح المخروطية.

[1]



الشكل 1.1: عملية الخراطة.

3.1. عمليات الخرّاطة:

تم تجميع مختلف عمليات الخرّاطة في الجدول 1.1.

الجدول 1.1: عمليات الخرّاطة. [2]

العمليات المنجزة	التعريف	رسم التصنيع أداة/قطعة
الخرّاطة الطولية	هي عملية إزالة المعدن من قطعة الشغل بشكل موازٍ لمحورها، بهدف تشكيل أسطح أسطوانية أو مخروطية.	
التسوية	هي عملية تشغيل تهدف إلى تشكيل سطح مستو (داخلي أو خارجي) بشكل عمودي على محور دوران القطعة.	
التعيق	هي عملية إزالة المعدن من قطعة الشغل بهدف تشكيل أخدود، سواء كان ذلك على السطح الداخلي أو الخارجي للقطعة.	
التثقيب	هو عملية تشغيل تهدف إلى تشكيل ثقب في القطعة (سواء كان ثقب نافذ أو غير نافذ).	
الشطف	هو عملية تشغيل تهدف إلى تشكيل مخروط صغير لإزالة الزوايا الحادة من قطعة الشغل.	

4.1. المخرط:

1.4.1. تعريف المخرطة:

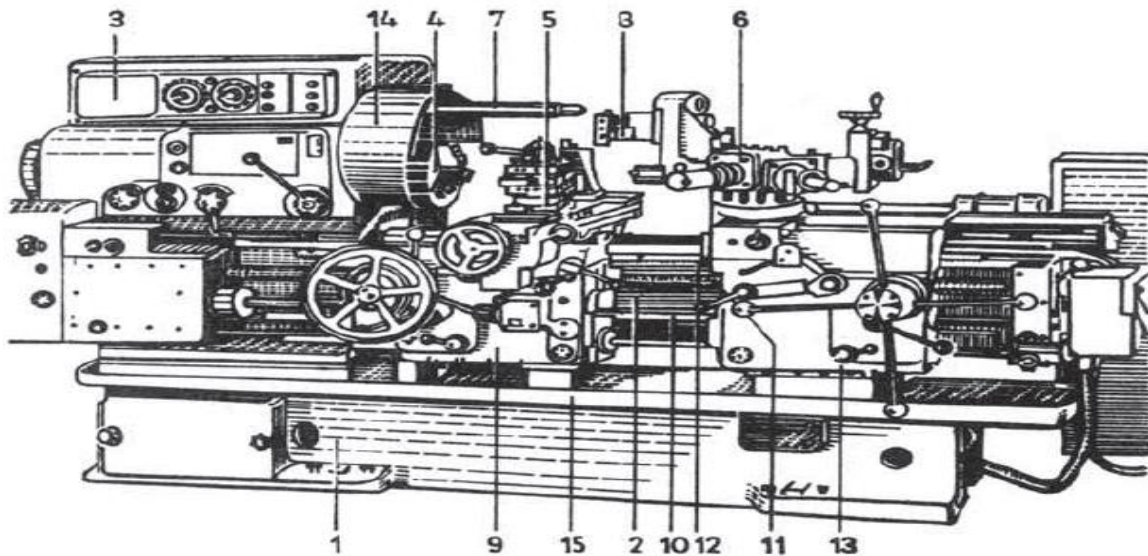
المخرطة هي وحدة من أهم وأقدم الآلات المستخدمة في الورش، وقد شهدت تطورات كبيرة على مر الزمن. تُستخدم المخرط في تصنيع الأشكال الأسطوانية والمخروطية مثل المسامير، الأعمدة، الجلب، الأقراص، اللولبيات، والأجزاء ذات الشكل المخروطي. بالإضافة إلى ذلك، يمكنها تشغيل المسبوكات والأجزاء غير منتظمة الشكل. [3]

مع التطور المستمر، أصبحت المخرط قادرة على معالجة أشكال أخرى مثل الأجزاء المربعة والمسدسة، من خلال إضافة أدوات ومعدات ملحقة. تُعد المخرطة آلة متعددة الاستخدامات، حيث يمكن توسيع نطاق تطبيقاتها بتركيب تجهيزات إضافية تلائم مختلف احتياجات التشغيل. يوجد أنواع مختلفة من المخرط من حيث التصميم والشكل، وفي هذه الدراسة تم استعمال المخرطة النصف آلية. [3]

2.4.1. المخرطة النصف آلية:

تعد هذه المخرط، المعروفة أيضًا بالمخرط البرجية، نوعًا خاصًا من المخرط التي تجمع بين التشغيل اليدوي والخصائص الآلية، مما يعزز الكفاءة والدقة في عمليات المعالجة. تم تصميمها لأداء مهام متنوعة في الخرطة البسيطة والدقيقة، مع إتاحة التحكم اليدوي للمشغل في بعض الوظائف حسب متطلبات الإنتاج. تُستخدم هذه المخرط النصف آلية في عمليات الإنتاج متوسطة الحجم، لكنها غير مناسبة لعمليات الخرطة المعقدة. [4]

* أجزاء المخرطة النصف آلية ووظائفها:



الشكل 2.1: مخرطة نصف آلية. [4]

المخرطة النصف آلية الموضحة في الشكل 2.1 تتكون من الأجزاء التالية:

- القاعدة (1): وظيفتها حمل الفرش وباقي أجزاء المخرطة.
- الفرش (2): يثبت عليه من الجهة اليسرى صندوق التروس الرئيسي وصندوق تروس التغذية ويثبت فيها دليل البرج والمجاري المستعرضة.
- صندوق التروس (3): يحتوي على مجموعة تروس السرعات والتغذية كما يحمل عمود الدوران.
- عمود الدوران (4): يحمل الظرف القابض الذي يثبت به المشغولة.
- الراسمة (5): يثبت بها حامل أقلام الخراطة ذو الأربعة أوجه، لإمكانية تثبيت أقلام خراطة إضافية في حالة تعدد عمليات التشغيل على القطعة المصنعة، بالإضافة إلى تثبيت قلم قطع بحامل القلم أو تثبيته بحامل آخر مقابل له بوضع عكسي وذلك حسب تصميم المخرطة.
- البرج السداسي (6): مثبت على عربة البرج، وهو عبارة عن منشور سداسي الأوجه بكل وجه ثقب كبير لتثبيت أدوات القطع المختلفة، يدار البرج تلقائياً في نهاية مشوار الرجوع بزواوية قدرها 60° .
- مسمار إحكام (7): لضمان التمرکز الدقيق لأدوات القطع بالبرج.
- أدوات القطع (8): تثبت بالبرج حسب ترتيب عمليات التشغيل.
- العربة (9): تنزلق على الفرش وهي تحمل الراسمة التي تحمل حامل أقلام القطع.
- عمود التغذية (10): يسمى أيضاً بعمود الجر يستخدم لحركة العربة آلياً عند التشغيل العادي.
- عمود المرشد (11): يستخدم عند قطع القلاووظ.
- جريدة مسننة (12): توجد أسفل الفرش مباشرة يعشق بها ترس مثبت بالعربة مكان انزلاقها على الفرش.
- راسمة البرج (13): تحمل البرج السداسي وتنزلق على البرج بحركة طولية.
- ساتر وقائي (14): للحماية في المخرطة من تناثر الرأش وسائل التبريد.
- وعاء صندوق (15): لتجميع الرأش وسائل التبريد. [4]

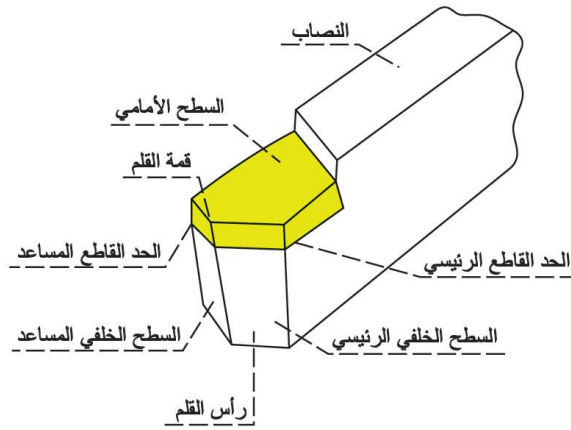
5.1. أقلام الخراطة:

هي أدوات قطع معدنية تُركب على الحامل وتعد من المعدات الأساسية في عملية الخراطة، حيث تقوم بإزالة المعدن من قطعة الشغل أثناء العملية. وتختلف هذه الأدوات من حيث الأحجام والأشكال. [5]

1.5.1. أجزاء أقلام الخراطة:

يتكون قلم الخراطة من عدة أجزاء موضحة في الشكل 3.1 وتتمثل في: [5]

- النصاب جسم الأداة هو الجزء الذي يحمل عناصر القطع التي تتكون منها أداة القطع، يتم تثبيته في مكانه في المخرطة.
- وجه القطع هو السطح الذي ينزلق عليه الرأش عند القطع.
- وجه الرأش هو السطح الناتج عن مرور الأداة عبر الجزء المراد قطعه، يتكون السطح المقطوع من وجهين وجه رئيسي ووجه ثانوي يعطي الوجه الرئيسي تقاطعه مع وجه القطع وحافة القطع الرئيسية.
- حافة القطع الرئيسية حافة متطورة مخصصة لإزالة المواد وتتشكل عند تقاطع وجه القطع ووجه البقايا.
- حافة القطع الثانوية تمتد الحافة الثانوية من نهاية الحافة الرئيسية في اتجاه آخر وتتشكل عند تقاطع وجه القطع وداخل وجه البقايا.



الشكل 3.1: أجزاء قلم الخراطة. [5]

6.1. أدوات القطع:

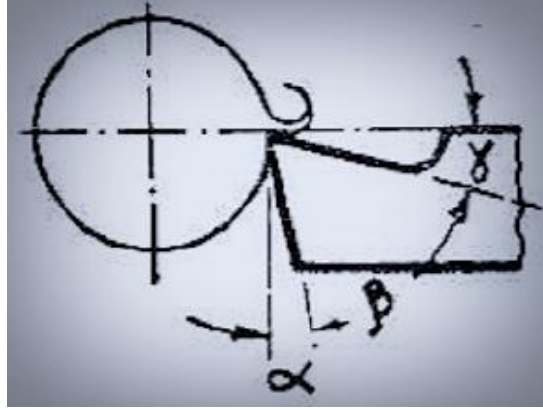
1.6.1. العوامل المتحكمة في تصنيع أدوات القطع:

تصنع أدوات القطع بمختلف أشكالها اعتماداً على عدة عوامل، منها: [6]

- دقة عملية القطع: بحسب خشونة او نعومة العمليات المنجزة.
- اتجاه عملية القطع: يجب أن يتم القطع في نفس اتجاه الحد القاطع، لأن الجزء الذي يفصل المعدن عن المشغولة يتطلب ذلك، فلا يجوز القطع بعكس الاتجاه.
- نوع عملية القطع: تتنوع عمليات القطع مثل القطع الخارجي، الطولي، العرضي، والمجاري.
- معدن الحد القاطع: تصنع أدوات القطع من معادن مختلفة تتباين في صلابتها، مثل الفولاذ، المعادن الصلبة، الألماس، والخزف.

- زوايا أدوات القطع: يتشكل الحد القاطع من مجموعة من السطوح المائلة بزوايا محددة موضحة في الشكل 4.1 وهي: [6]

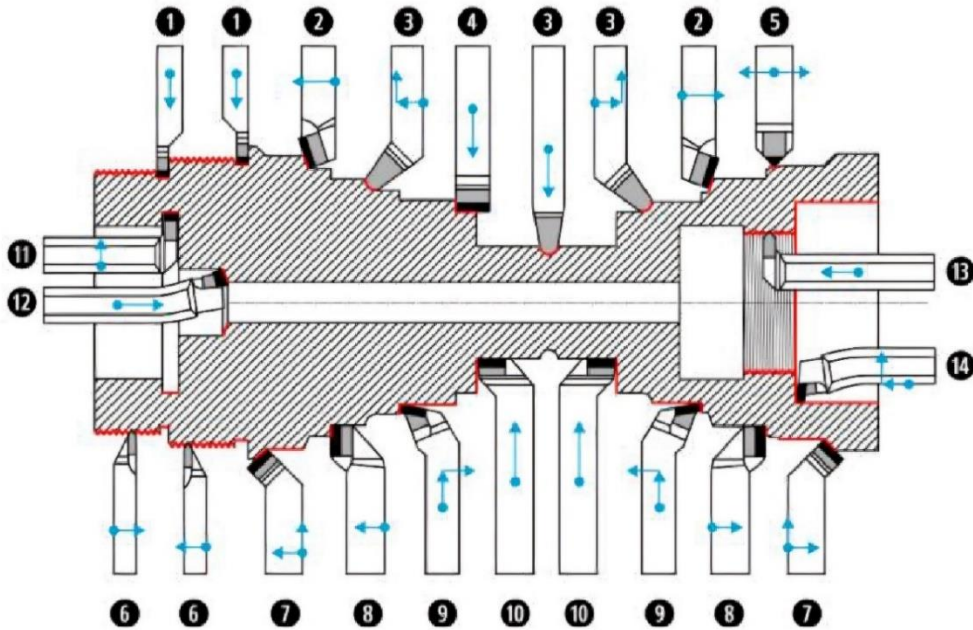
- زاوية الخلووس (α).
- زاوية القطع (β).
- زاوية الجرف (γ).



الشكل 4.1: زوايا قلم الخراطة. [3]

2.6.1. أنواع أدوات القطع:

تختلف أنواع أدوات القطع على المخرطة وتأخذ أشكالاً مختلفة باختلاف أهداف القطع المخصصة من أجله. الشكل 5.1 والجدول 2.1 يوضحان مختلف أدوات القطع المستخدمة في الخراطة، والسطح الذي تشغله كل أداة، وتسمياتها على التوالي. [7]



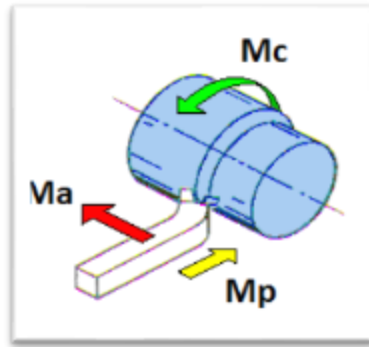
الشكل 5.1: مختلف أدوات القطع الداخلية والخارجية. [7]

الجدول 2.1: مختلف أدوات القطع. [7]

الرقم	اسم الأداة	الرقم	اسم الأداة
01	أداة التبييت (العنق).	08	أداة جانبية.
02	أداة الخراطة الطولية.	09	أداة الخراطة المنحنية.
03	أداة التصحيح.	10	أداة التسوية.
04	أداة القطع.	11	أداة التبييت الداخلي.
05	أداة التلامس.	12	أداة التجويف.
06	أداة اللولبة الخارجية.	13	أداة اللولبة الداخلية.
07	أداة حذف الزوايا (شطفة).	14	أداة التسوية الداخلية.

7.1. الحركة النسبية (أداة/قطعة) في عملية الخراطة:

لكي تتم عملية قطع المعادن المختلفة على المخرطة يجب أن تكون هناك حركات أساسية للقطعة المراد تشغيلها وقلم المخرطة، ويمكن تلخيصها بالعناصر الأساسية الموضحة في الشكل 6.1. [8]



الشكل 6.1: حركات القطع. [8]

1.7.1. حركة القطع M_c :

هي الحركة الضرورية لإزالة طبقة من معدن قطعة الشغل خلال دورة واحدة، حيث تدور قطعة العمل حركة دائرية بسرعة عالية ضد الحد القاطع الذي يقوم بفصل الرأش، تسمى هذه الحركة بالحركة الأساسية وتسمى السرعة التي تتحرك بها قطعة العمل أثناء القطع بسرعة القطع. [9]

2.7.1. حركة التغذية M_a :

هي الحركة النسبية بين الأداة وقطعة الشغل والتي تتسبب في حدوث إزالة مستمرة للمعدن بوجود حركة القطع، وهي حركة مستقيمة بطيئة حيث تعطى هذه الحركة للأداة. [6]

3.7.1 حركة الاختراق M_p :

هي الحركة النسبية بين الأداة والقطعة حيث يتغلغل القلم داخل معدن الشغلة في اتجاه عمودي على محور الشغلة، تعطى هذه الحركة للأداة. [6]

8.1 شروط القطع:

1.8.1 سرعة القطع V_c :

هي انتقال الحد القاطع للقلم باتجاه الحركة الأساسية بالنسبة إلى السطح المشغل في وحدة الزمن، يرمز له بالرمز V_c ويقاس ب: m / min . وتحسب بالعلاقة (1.1). [6]

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \dots\dots\dots (1.1)$$

حيث:

D : قطر السطح المشغل معبر عنه ب: mm .

N : عدد دورات المشغولة في الدقيقة معبر عنه ب: tr / min .

2.8.1 سرعة التغذية V_f :

هي مقدار انتقال الحد القاطع للقلم عند دوران القطعة المشغلة دورة واحدة، يرمز له ب V_f يقاس بـ mm / min وتحسب بالعلاقة (2.1). [10]

$$V_f = N \cdot f \dots\dots\dots (2.1)$$

حيث:

f : التغذية معبر عنها ب: mm / tr

3.8.1 عمق القطع a_p :

هي المسافة التي يتغلغلها القلم داخل معدن الشغلة في اتجاه عمودي على محور الشغلة، حيث تمثل قيمة نصف الفرق بين المشغولة وقطر السطح المشغل الذي يحصل عليه بعد شوط واحد لقلم القطع. [10] وحدتها mm وتحسب بالعلاقة (3.1).

$$a_p = \frac{D-d}{2} \dots\dots\dots (3.1)$$

9.1 وصف خشونة السطح:

لطالما كانت خشونة السطح، التي تُعتبر ظاهرة حتمية في عمليات التشغيل، محط اهتمام كبار العلماء عبر التاريخ. حتى ثلاثينيات القرن العشرين، كان تحليل الأسطح وتصنيف خشونتها يتم بشكل رئيسي من خلال

مقارنة بصرية وحسية باستخدام معايير مستمدة من أكثر طرق التشغيل شيوعاً في ذلك الوقت. تقنية قياس خشونة السطح تُعدّ واحدة من أكثر التقنيات استخداماً، وقد شهدت تحسينات ملحوظة عبر الزمن. [11]

1.9.1. تعريف خشونة السطح:

خشونة السطح هي خاصية جوهرية تعكس حالة سطح المادة الصلبة. الأسطح الناتجة عن التشغيل ليست مثالية، إذ تتضمن تفاوتات ناتجة عن عمليات التشغيل، الأدوات المستخدمة، المادة المشغّلة، وغيرها من العوامل. تؤثر حالة السطح على الوظيفة العامة له، وكلما كان مؤشر خشونة السطح أقل، زادت صعوبة تحقيقه، مما يؤدي بدوره إلى زيادة التكلفة الإنتاجية. [11]

2.9.1. أنواع الأسطح:

* السطح الهندسي (Geometric Surface):

يتم تحديده نظرياً في الرسومات التصميمية من خلال المكتب الهندسي باستخدام الأبعاد الاسمية. [11]

* السطح المحدد (Specified Surface):

ينتج من تعديل السطح الهندسي وفقاً لمتطلبات المكتب الهندسي، الذي يحدد حدود تصنيع هذا السطح باستخدام الرموز والأبعاد المحددة. [11]

* السطح المقاس (Measured Surface):

هو السطح المحدد بواسطة أدوات القياس المستخدمة لتوصيف السطح الحقيقي بناءً على البيانات المُجمّعة. [11]

* السطح الحقيقي (Real Surface):

هو السطح الفعلي الناتج عن عملية التصنيع. [11]

3.9.1. تصنيف عدم استواء الأسطح:

يمكن تقسيم عدم استواء الأسطح إلى ما يلي، تبعاً إلى أشكالها المختلفة الموضحة في الشكل (7.1). [12]



الشكل 7.1: الأشكال المختلفة لعدم استواء الأسطح. [12]

* الحيود:

وهو يعني الانحراف أو عدم الاستواء في الأشكال المسطحة، وعدم الاستدارة في الأشكال الأسطوانية، وينشأ هذا النوع نتيجة لوجود خلوص بين المسارات الدليلية للأدلة الانزلاقية لماكينات التشغيل أو لانحناء الماكينة أو المشغولة نتيجة عدم التثبيت الأمثل للمشغولة (شكل 8.1). [12]



الشكل 8.1: حيود. [12]

* التموجات:

تنتج من الدوران غير المنتظم أو الاهتزازات الزائدة لأعمدة ماكينات التشغيل أو لحدوث أخطاء في تثبيت المشغولة (شكل 9.1). [12]



الشكل 9.1: تموجات. [12]

* الأخاديد:

تنتج نتيجة لوجود عيوب في التركيب البنائي لسطحها كما تنشأ من شكل حد القطع للأداة (شكل 10.1). [12]



الشكل 10.1: أخاديد. [12]

* الحزوز:

تنشأ نتيجة أسلوب توجيه العدة على السطح المشغل والتصاق الرائش بالحد القاطع للعدة (شكل 11.1). [12]



الشكل 11.1: حزوز. [12]

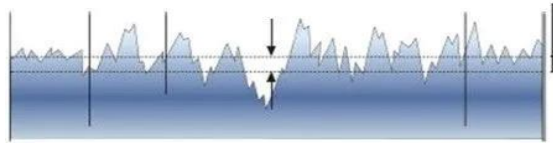
4.9.1. مقاييس خشونة:

لكي يتم وصف خشونة الأسطح بطريقة محددة لا بد من الاتفاق على مقاييس عديدة تعبر عن درجة خشونة السطح. وقد اتفق المختصون على عدد من المقاييس لتكون موحدة تستخدم للتمييز بين الأسطح ذات درجات الخشونة المختلفة وهذه المقاييس هي: [12]

*** الخشونة المتوسطة R_a :**

هي المتوسط الحسابي لمدى ابتعاد الانحرافات عن البعد الفعلي المتوسط (شكل 12.1). ويتم حسابها بقسمة مجموع المساحات المظلة في الشكل على طول العينة. [12]
ويمكن حسابها بالعلاقة (4.1).

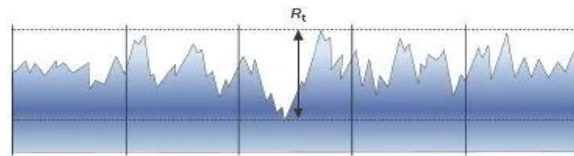
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n \dots \dots \dots (4.1)$$



الشكل 12.1: الخشونة المتوسطة. [12]

*** عمق الخشونة R_t :**

هو البعد بين الحد الأقصى والحد الأدنى للانحرافات (شكل 13.1). ويعتبر من أكثر المقاييس المستخدمة لتقييم بنية الأسطح لكنه لا يعطي فكرة واضحة عن الخواص الانزلاقية للأسطح ومقاومتها للتآكل لذلك يتم الاستعانة بمقاييس أخرى للوصول إلى أعلى دقة في تقييم الأسطح. [12]

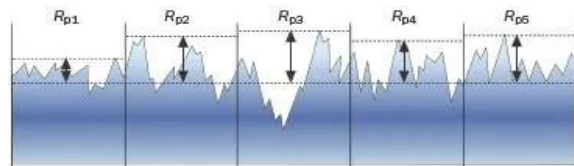


الشكل 13.1: عمق الخشونة. [12]

*** عمق الاستواء R_p :**

هو البعد بين الحد الأقصى والخط المرجعي المتوسط للانحرافات (شكل 14.1). ويدل هذا المقياس على المقدار اللازم لضغط قمم التموج الفعلية حتى تصبح مستوية، يمتاز هذا المقياس عن المقاييس الأخرى بأنه يعطي أفضل بيان عن الأداء الوظيفي للسطح مثل: الأسطح الانزلاقية، أسطح الازدواج التداخلية التي يتم تركيبها بالكبس [12]. يحسب بالعلاقة (5.1).

$$R_p = \frac{R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_{p4} + R_{p5}}{5} \dots \dots \dots (5.1)$$

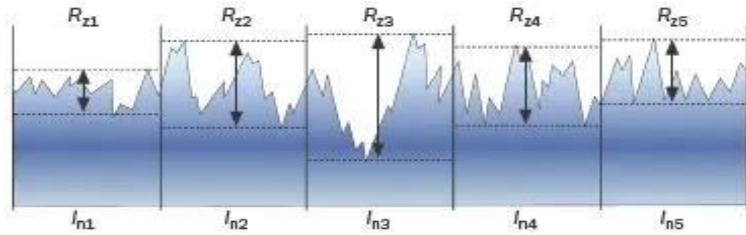


الشكل 14.1: عمق الاستواء. [12]

*** متوسط اقصى انحرافات السطح R_z :**

هو متوسط الفرق بين أعلى خمسة انحرافات وأدنى خمسة انحرافات في العينة المقاسة (شكل 15.1). [12] يحسب بالعلاقة (6.1).

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \dots \dots \dots (6.1)$$



الشكل 15.1: متوسط اقصى انحرافات السطح. [12]

*** متوسط الجذر التربيعي لانحرافات السطح R_q :**

هو الجذر التربيعي لمتوسط مجموع مربعات الانحرافات وتظهر أهمية هذا المقياس عند تقييم الخواص الضوئية للأسطح [12]. ويحسب بالعلاقة (7.1).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n^2} \dots \dots \dots (7.1)$$

10.1 . خاتمة:

في هذا الفصل، تناولنا عملية الخرطة من مختلف جوانبها. بدأنا بتعريف العملية وتوضيح بعض أنواعها. ثم تعرفنا على المخارط وبشكل خاص تطرقنا إلى المخرطة النصف آلية، حيث استعرضنا مكوناتها ووظائفها التي تسهم في تنفيذ عمليات الخرطة بدقة. اخترنا هذا النوع من المخارط نظراً لتميزه بالكفاءة والدقة، مما يجعله مناسباً للتطبيقات التجريبية في هذه الدراسة. كما ناقشنا الأدوات المستخدمة في الخرطة، مع بيان مميزاتها واستخداماتها لتحقيق جودة ودقة عالية في الإنتاج. بالإضافة إلى ذلك، تطرقنا إلى الحركات النسبية التي تحدث بين الأداة وقطعة العمل أثناء عملية الخرطة، موضحين شروطها الأساسية، المتمثلة في سرعة القطع، وسرعة التغذية، وعمق القطع. في ختام الفصل، قدمنا تعريفاً لمفهوم خشونة السطح وأثرها على جودة السطح، مع وصف لعيوبه. كما تناولنا المقاييس المحددة لخشونة السطح، موضحين أهمية هذه المقاييس في ضمان تحقيق نتائج تشغيل دقيقة وذات جودة عالية.

الفصل الثاني:

طرق تصميم التجارب

وتحليل النتائج

1.2.1. مقدمة:

تصميم التجارب هو منهجية علمية تُعنى بتنظيم وإجراء الاختبارات بشكل منظم ودقيق بهدف الحصول على أقصى استفادة من البيانات بأقل عدد ممكن من التجارب. يهدف هذا النهج إلى تحسين كفاءة البحث، تقليل الوقت والتكاليف، والحصول على نتائج دقيقة وموثوقة. يعتمد تصميم التجارب على قواعد رياضية وخطوات منهجية، مما يسمح بدراسة تأثير العديد من العوامل والمتغيرات بشكل متزامن، وتحليل البيانات باستخدام نماذج رياضية دقيقة.

في هذا الفصل، سنناقش بعض طرق تصميم التجارب التي سيتم استخدامها في دراستنا، وتشمل طريقة تاغوشي، تصميم المركب المركزي، وطريقة بوكس بنكن. سنركز على دراسة تأثير معلمات القطع على مجموعة من الاستجابات المهمة، مثل خشونة السطح ودرجة حرارة القطع. بالإضافة إلى ذلك، سنتناول أدوات تحليل البيانات مثل: تحليل التباين (ANOVA)، تحليل الانحدار، وتقنيات تحسين الاستجابة بهدف فهم وتحليل النتائج بشكل شامل ودقيق والوصول إلى شروط القطع المثلى.

2.2. طرق تصميم التجارب:

1.2.2. طريقة تاغوشي :

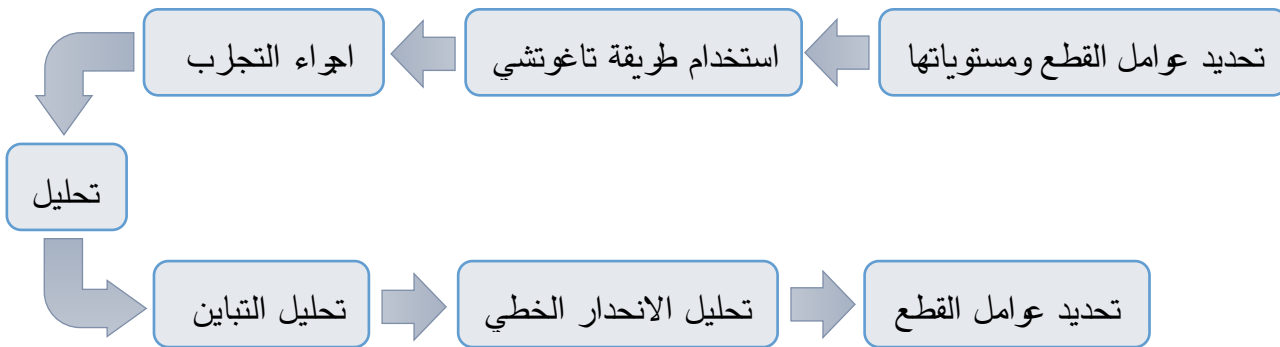
* تعريف:

هي طريقة إحصائية طورها العالم الياباني (Genichi Taguchi) لتحسين تصميم المنتج وتصنيعه، والذي طبق بنجاح الأساليب الإحصائية التطبيقية الفعالة لتحسين استقرار العمليات التكنولوجية وزيادة قدراتها الإنتاجية . اقترح العالم Genichi Taguchi استخدام المصفوفات المتعامدة لتصميم التجارب، يمكن للباحثين والمهندسين تطبيق هذه التصاميم دون اكتساب معرفة إحصائية مقدّمة، تمتاز بالبساطة وسهولة التكيف مع التجارب المعقدة التي تتضمن عدداً من العوامل بأعداد مختلفة من المستويات. طريقة تاغوشي توفر المعلومات المطلوبة بأقل عدد ممكن من التجارب، تكمن الميزة الرئيسية لهذه التصاميم في بساطتها وسهولة تكيفها مع تجارب أكثر تعقيداً. [13]

* شرح بعض المفاهيم:

- **خطت التجارب:** هي طريقة منظمة لجمع البيانات من خلال تغيير متغيرات معينة (العوامل) لملاحظة تأثيرها على نتيجة معينة (الاستجابة). [14]

- **المصفوفات المتعامدة:** هي أدوات رياضية تستخدم في تصميم التجارب، وتساعد في تقليل عدد التجارب اللازمة وتبسيط تحليل البيانات. باختصار، قدم تاغوشي طريقة عملية وبسيطة لتصميم التجارب، مما يجعلها أداة قيمة للباحثين والمهندسين في العديد من المجالات. [14]
- قسم تاغوشي العوامل التي تسبب الانحراف عن القيمة المستهدفة وتؤثر على خصائص ووظائف المنتجات إلى نوعين: [15]
- عوامل يمكن السيطرة عليها (عوامل تصميمية): وهي التي يمكن وضع قيمتها أو تعديلها من خلال المصمم أو مهندس العملية.
- عوامل لا يمكن السيطرة عليها (عوامل الضوضاء): وهي مصادر الانحراف وغالبا ما تتعلق ببيئة الإنتاج أو العوامل التي لا يمكن الرقابة أو السيطرة عليها.
- تنشأ هذه الحالة عندما تكون القيمة المحددة هي الأكثر طلبا مما يعني أنه لا توجد قيمة أصغر أو أكبر. توجد العديد من المتطلبات الواجب توفرها في طريقة تاغوشي الشكل 1.2 يبرز أهمها: [15]



الشكل 1.2: منهجية البحث.

2.2.2. منهجية سطح الاستجابة RSM:

هي مجموعة من التقنيات الإحصائية والرياضية المصممة لتطوير وتحسين العمليات والمنتجات. تستخدم هذه المنهجية بشكل واسع في مجالات التصميم والتطوير وتحسين المنتجات الحالية التي تتأثر بالعديد من العوامل، حيث يمكن أن تساعد في تحديد العوامل الأكثر أهمية، وتحديد القيم المثلى لكل عامل لتحقيق أفضل نتيجة ممكنة، ولها تطبيقات كبيرة في عدة مجالات منها الصناعة، الزراعة، الطاقة، والخدمات الصحية. [16]

تركز تطبيقات RSM عادة على الحالات التي تؤثر فيها عدة متغيرات مدخلة على أداء العملية أو جودة المنتج. يطلق على هذه القياسات أو المؤشرات "بالاستجابة". تقاس الاستجابة غالبا على مقياس مستمر، لكن يمكن أن

تكون أيضا استجابات نوعية أو حسية، في معظم التطبيقات الواقعية يكون هناك أكثر من استجابة واحدة تؤخذ بعين الاعتبار. [16]

تختلف استجابة الإخراج بناء على القيم المتباينة لمتغيرات الإدخال التي يمكن تمثيلها كمتغيرات عشوائية X_i مع $i = 1, \dots, n$ ، يتم ملاحظة هذه القيم من خلال التجارب العملية. تتيح المتغيرات العشوائية التعبير عن المتغيرات الزمنية والمكانية في قيم متغيرات الإدخال، يتم استغلال هذه التغيرات لتطوير نماذج رياضية تظهر العلاقة بين استجابة الإخراج ومتغيرات الإدخال. التمثيل الهندسي لهذه العلاقة يعرف بسطح الاستجابة، والذي يتم إنشاؤه عبر تعديل النموذج باستخدام دوال رياضية مثل كثير الحدود. [16]

تعرف متغيرات الإدخال التي يمكن التحكم بها أثناء التجارب أو الاختبارات بالمتغيرات المستقلة، وهي تخضع تحت إشراف المهندس أو الباحث، في حين يطلق على المخرجات أو الخصائص المراد تحسينها بالمتغيرات التابعة [16]. يمكن التعبير عن العلاقة الفعلية بالمعادلة (1.2).

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \dots \dots \dots (1.2)$$

حيث الشكل الحقيقي لدالة الاستجابة f غير معروف وربما معقد للغاية، و ε هو مصطلح يمثل مصادر أخرى للتباين غير المحسوبة في f . وبالتالي، فإن ε يشمل تأثيرات مثل خطأ القياس على الاستجابة، ومصادر أخرى للتباين المتأصلة في العملية أو النظام (الضوضاء الخلفية، أو التباين العام / الخاص في لغة مراقبة العمليات الإحصائية)، وتأثير المتغيرات الأخرى (ربما غير المعروفة)، وما إلى ذلك. سنعامل ε كخطأ إحصائي، غالباً ما نفترض أنه يتبع توزيعاً طبيعياً بمتوسط صفر وتباين σ^2 إذا كان متوسط ε صفراً، فإن: [16]

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \dots \dots \dots (2.2)$$

تسمى المتغيرات $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ في المعادلة (2.2) عادةً بالمتغيرات الطبيعية، لأنها تُعبر بوحدة القياس الطبيعية، مثل الدرجة المئوية ($^{\circ}C$) أو رطل لكل بوصة مربعة (ψ) أو غرام لكل لتر للتركيز. في العديد من أعمال استجابة السطح، من الملائم تحويل المتغيرات الطبيعية إلى متغيرات مشفرة x_1, x_2, \dots, x_k ، والتي عادةً ما تكون عديمة الأبعاد ومتوسط صفر ونفس الانتشار أو الانحراف المعياري. بدلالة المتغيرات المشفرة، تُكتب دالة الاستجابة الحقيقية الآن بالمعادلة 3.2: [16]

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \dots \dots \dots (3.2)$$

نظراً لأن شكل دالة الاستجابة الحقيقية f غير معروف، يجب علينا تقريبه. في الواقع، يعتمد استخدام RSM بنجاح بشكل حاسم على قدرة المُجرب على تطوير تقريب مناسب لـ f . عادةً ما يكون كثير الحدود منخفض الرتبة في منطقة صغيرة نسبياً من فضاء المتغير المستقل مناسباً. في العديد من الحالات، يُستخدم إما نموذج

من الدرجة الأولى أو من الدرجة الثانية. بالنسبة لحالة متغيرين مستقلين، فإن النموذج من الدرجة الأولى من حيث المتغيرات المشفرة يعبر عنه بالمعادلة (4.2). [16]

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots (4.2)$$

يُسمى شكل النموذج من الدرجة الأولى في المعادلة (4.2) أحياناً بنموذج التأثيرات الرئيسية، لأنه يتضمن فقط التأثيرات الرئيسية للمتغيرين x_1 و x_2 . إذا كان هناك تفاعل بين هذين المتغيرين، يمكن إضافته إلى النموذج بسهولة ويعبر عنه بالمعادلة (5.2): [16]

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \dots (5.2)$$

غالبًا ما يكون الانحناء في سطح الاستجابة الحقيقي قويًا بدرجة كافية بحيث يكون النموذج من الدرجة الأولى (حتى مع تضمين حد التفاعل) غير كافٍ. من المحتمل أن يكون نموذج من الدرجة الثانية مطلوبًا في هذه الحالات. بالنسبة لحالة متغيرين، فإن النموذج من الدرجة الثانية يكتب بالمعادلة (6.2). [16]

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \dots (6.2)$$

من المحتمل أن يكون هذا النموذج مفيدًا كتقريب لسطح الاستجابة الحقيقي a في منطقة صغيرة نسبيًا . يُستخدم النموذج من الدرجة الثانية على نطاق واسع في منهجية سطح الاستجابة لعدة أسباب. من بينها ما يلي:

- مرونة النموذج من الدرجة الثانية: إنه من المرنة للغاية. يمكن أن يتخذ مجموعة واسعة من الأشكال الوظيفية، لذلك غالبًا ما يعمل جيدًا كتقريب لسطح الاستجابة الحقيقي.

- من السهل تقدير المعاملات (β) في النموذج من الدرجة الثانية. يمكن استخدام طريقة المربعات الصغرى، هناك تجربة عملية كبيرة تشير إلى أن النماذج من الدرجة الثانية تعمل بشكل جيد في حل مشاكل سطح الاستجابة الحقيقية. بشكل عام، النموذج من الدرجة الأولى يعبر عنه بالمعادلة (7.2). [16]

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \dots (7.2)$$

والنموذج من الدرجة الثانية يعبر عنه بالمعادلة (8.2). [16]

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \dots (8.2)$$

في بعض الحالات، يتم استخدام كثيرات الحدود التقريبية من الرتبة الأعلى من الثانية. الدافع العام لوظيفة الاستجابة الحقيقية التقريبية متعددة الحدود يستند إلى توسع تايلور حول النقطة. [16]

أخيرًا، هناك ارتباط وثيق بين RSM وتحليل الانحدار الخطي. على سبيل المثال النموذج المعبر عنه بالمعادلة (9.2). [16]

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \dots (9.2)$$

3.2.2. طريقة Box-Behnken:

في عام 1960، اقترح العالمان بوكس وبنكن تصميمات تهدف إلى إعداد نماذج رياضية من الدرجة الثانية. يتميز هذا النوع من التصميمات بأن العوامل المدروسة تأخذ ثلاثة مستويات: -1 ، 0 ، $+1$. تُعتبر هذه التصميمات سهلة التطبيق وتتيح ترتيبًا تسلسليًا للتجارب، حيث يمكن دراسة عدد محدد من العوامل مع إمكانية إضافة عوامل جديدة دون فقدان النتائج السابقة. [17]

* كيفية بناء تصميمات Box-Behnken:

عندما ندرس ثلاثة عوامل، يتم تمثيل التصميم بواسطة مكعب ثلاثي الأبعاد. حيث إذا زاد عدد العوامل، يتم الاعتماد على مكعبات فائقة الأبعاد (ذات 4 أو 5 أبعاد). وعندما يتجاوز عدد الأبعاد الثلاثة، نتحدث عن n مكعب بعدي، حيث " n " يشير إلى عدد الأبعاد. على سبيل المثال: [17]

- المكعب ذو 4 أبعاد يُسمى 4-مكعب.
- المكعب ذو 5 أبعاد يُسمى 5-مكعب.

تعتمد هذه التصميمات على اختيار النقاط التجريبية عند منتصف حواف المكعب. هذا التوزيع يهدف إلى تقليل عدد التجارب المطلوبة وتحقيق كفاءة أكبر. عادةً ما يتم وضع نقطة أو أكثر في مركز المجال المدروس لضمان تمثيل كامل. [17]

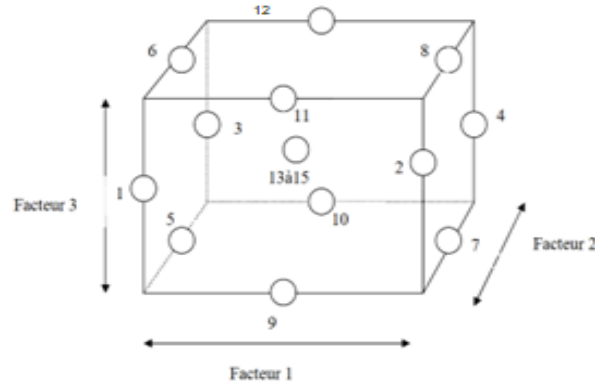
* المكونات الهندسية للمكعب والمكعب الفائق:

للمكعب العادي أبعاد وعناصر هندسية محددة: [17]

- 8 رؤوس (تمثل البعد صفر).
- 12 حافة (وهي مقاطع مستقيمة، تمثل البعد الأول).
- 6 أوجه (مربعات، تمثل البعد الثاني).
- المكعب نفسه (يمثل البعد الثالث). أما المكعب الفائق (n -بعدي) فيحتوي على عناصر مشابهة تتوسع وفق عدد الأبعاد.

* تصميم Box-Behnken لثلاث عوامل:

في حالة وجود ثلاثة عوامل، يكون تصميم بوكس-بنكن مبنيًا على مكعب ثلاثي الأبعاد، النقاط التجريبية يتم اختيارها عند منتصف الحواف. يمتلك المكعب 12 حافة، وتُضاف عادةً ثلاث نقاط إضافية في مركز المجال المدروس. يُعتبر هذا التصميم كلاسيكيًا، ويتطلب تنفيذ 15 تجربة إجمالاً (12 نقطة عند الحواف و3 نقاط في المركز). يمثل الجدول 1.2 تصميم بوكس-بنكن لثلاث عوامل والذي أعطى 16 تجربة [17]



الشكل 2.2: رسم توضيحي لخطة Box-Behnken لثلاث عوامل. [17]

الشكل 2.2 يوضح كيفية توزيع النقاط في تصميم بوكس-بنكن لثلاثة عوامل، حيث تُحدد إحداثيات النقاط كالتالي: 0 ، $1 \pm$ ، $1 \pm$. يُبنى التصميم على مبدأ أن عاملين يشكلان مربعاً (4 نقاط)، بينما تكون إحداثيات العامل الثالث صفر. الجدول 1.2 يوضح تصميم بوكس-بنكن لثلاث عوامل.

الجدول 1.2: جدول تصميم بوكس-بنكن لثلاثة عوامل. [17]

رقم التجربة	العامل 1	العامل 2	العامل 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0

*** خصائص خطة Box-Behnken لثلاثة عوامل:**

قبل البدء في تنفيذ التجارب، يمكن تحديد عدة خصائص لخطة Box-Behnken، وهي: [17]

- الخطأ في معاملات النموذج: يتم تقديرها بدقة حتى ثابت معين.
- الخطأ في القيم المتوقعة: يقيس الفرق بين القيم المتوقعة والحقيقية.
- وظيفة التباين: تحدد كيفية توزيع خطأ التنبؤ عبر مجال الدراسة.

*** النموذج الرياضي المفترض:**

النموذج المستخدم مع خطة بوكس-بنكن يكون عادةً نموذجاً رياضياً من الدرجة الثانية يشمل التفاعلات بين العوامل وكذلك التأثيرات التربيعية يعبر عنه بالعلاقة (10.2). [17]

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + e \quad (10.2)$$

حيث:

e : يمثل خطأ التنبؤ.

a₀: معامل ثابت.

a₁, a₂, a₃: المعاملات الخطية للعوامل X₁, X₂, X₃.

a₁₂, a₁₃, a₂₃: معاملات التفاعلات الثنائية بين العوامل.

a₁₁, a₂₂, a₃₃: المعاملات التربيعية لكل عامل.

يحتوي هذا النموذج على 10 معاملات، مما يتطلب 10 معادلات على الأقل لتقديرها. وبما أن خطة بوكس-بنكن التقليدية لثلاثة عوامل تتضمن 15 نقطة تجريبية، فإن كل نقطة تجريبية توفر معادلة مستقلة تساعد في تقدير معاملات النموذج. [17]

4.2.2. تصميم المركب المركزي:

يُعتبر تصميم المركب المركزي دون شك الفئة الأكثر شهرة بين التصميمات من الدرجة الثانية، وقد تم تقديمه لأول مرة على يد بوكس وويلسون (Box and Wilson) في عام 1951. يستمد تصميم المركب المركزي (CCD) أهميته بشكل كبير من استخدامه في التجارب المتتابعة. يتضمن هذا التصميم الجمع بين تصميم عاملية بمستويين أو تصميم عاملية جزئية (بدقة من النوع V)، بالإضافة إلى 2k من النقاط المحورية أو النجمية كما هو موضح في الجدول 2.2: [16]

الجدول 2.2: تمثيل مستويات المتغيرات في النقاط المحورية والعاملية لتصميم المركب المركزي CCD

x_1	x_2	...	x_3
$-\alpha$	0	...	0
α	0	...	0
0	$-\alpha$...	0
0	α	...	0
\vdots	\vdots		\vdots
0	0	...	$-\alpha$
0	0	...	α

نتيجة لذلك، يتضمن التصميم نقاط عاملية F ، نقاط محورية $2k$ ، وعدد n_c من التكرارات في المركز. يُظهر التصميم طبيعته المتسلسلة بوضوح. حيث تمثل النقاط العاملية تصميمًا مثاليًا للتباين لنموذج من الدرجة الأولى أو لتفاعل عاملين. توفر تكرارات المركز معلومات مهمة حول وجود أي انحناء في النظام. وعند اكتشاف الانحناء، تُضاف النقاط المحورية لتقدير الشروط التربيعية الخالصة بكفاءة. وعلى الرغم من أن أصل تصميم المركب المركزي (CCD) يعود إلى التجارب المتسلسلة، إلا أنه يُعد تصميمًا فعالًا للغاية في الحالات التي تتطلب تجارب غير متسلسلة لتحليل استجابة السطح. في هذا السياق تلعب المكونات الثلاثة للتصميم أدوارًا مختلفة وهامة: [16]

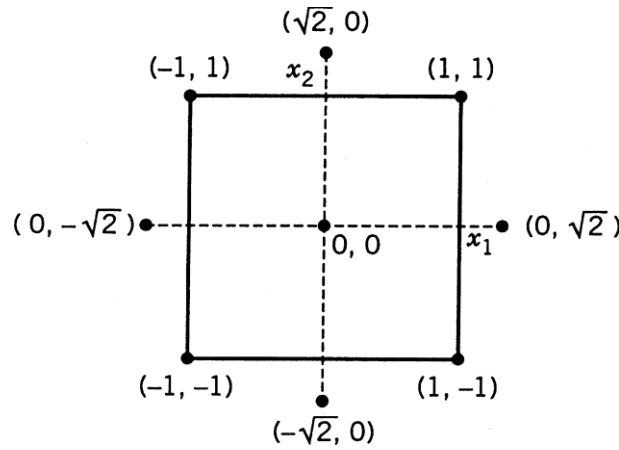
- الكسر ذو الدقة V : يساهم بشكل كبير في تقدير الشروط الخطية وتفاعلات العاملين. هذا الكسر مثالي للتباين بالنسبة لهذه الشروط، حيث تكون النقاط العاملية وحدها مسؤولة عن تقدير شروط التفاعل.
- النقاط المحورية تساهم بشكل كبير في تقدير الشروط التربيعية. وفي حالة عدم استخدام النقاط المحورية، يمكن فقط تقدير مجموع الشروط التربيعية $\sum_{i=1}^k \beta_{ii}$.
- تكرارات المركز: توفر تقديرًا داخليًا للخطأ (المعروف بالخطأ النقي) وتساهم في تقدير الشروط التربيعية.

* عوامل المرونة في تصميم المركب المركزي (CCD) :

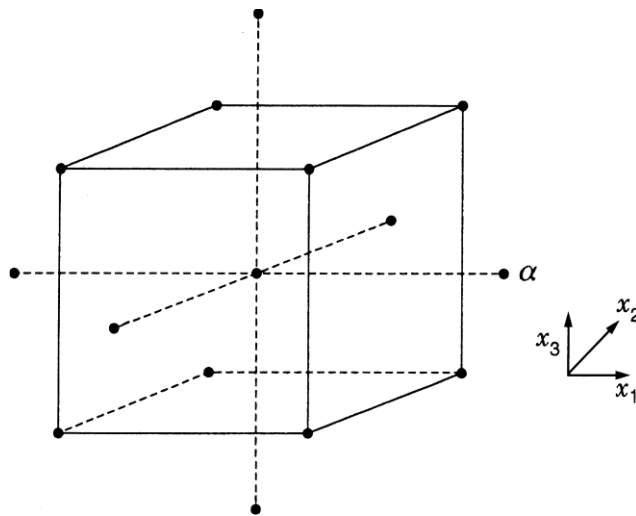
تعتمد مرونة التصميم على اختيار المسافة المحورية α ، عدد التكرارات المركز n_c وطبيعة الكسر العاملة (مستويين أو كسر جزئي). يُعد اختيار α مهمًا للغاية لأنه يحدد منطقة الدراسة التي يركز عليها التصميم. بينما

يعتمد اختيار n_c على توزيع التباين النسبي $[\hat{y}(x)]/\sigma^2$ في منطقة الدراسة. [16]

- عندما تكون $\alpha = \sqrt{k}$ يُوصف التصميم بأنه يقع على "كرة مشتركة (Common sphere)".
 - في حالة: $k=2$ تكون النقاط المحورية موزعة على دائرة متساوية الأبعاد.
 - في حالة: $k=3$ تكون النقاط المحورية على أوجه المكعب وتبعد بمقدار $\sqrt{3}$ عن المركز.
- يظهر هذا التوزيع بوضوح في الشكلين 3.2 و 4.2 على التوالي. [16]



الشكل 3.2: تصميم مركب مركزي لعدد العوامل $k=2$ وقيمة $\alpha = \sqrt{2}$.



الشكل 4.2: تصميم مركب مركزي لعدد العوامل $k=3$ وقيمة $\alpha = \sqrt{3}$.

3.2. طرق تحليل النتائج:

1.3.2. نسبة الإشارة إلى الضوضاء (signal/noise ratio):

* تعريف نسب الإشارة إلى الضوضاء:

تمثل نسب الإشارة إلى الضوضاء (S/N) أداة تحليلية تهدف إلى قياس وتحليل تأثير العوامل المختلفة على تقليل التباين وتحسين الجودة. تعتمد هذه النسب على تقييم مقدار التباين في استجابات النظام بدلاً من التركيز فقط على متوسط الاستجابة، مما يوفر فهماً أعمق للعوامل التي تؤثر في استقرار العملية وجودتها. طور "تاغوشي" طريقة لتحويل البيانات المكررة إلى قيمة عددية واحدة تُعرف بنسبة الإشارة إلى الضوضاء. تجمع هذه النسبة بين عدة قياسات مكررة (تتطلب على الأقل قياسين) في قيمة موحدة تعكس مستوى التباين الناتج. تختلف أنواع نسب الإشارة إلى الضوضاء بناءً على طبيعة الخاصية قيد الدراسة. [18] وتنقسم إلى ثلاثة أنواع رئيسية: [18]

- الأقل هو الأفضل (Lower is Better –LB): تُستخدم في الحالات التي يكون فيها تقليل الاستجابة هدفاً رئيسياً.
- القيمة الاسمية هي الأفضل (Nominal is Best –NB): تُستخدم عندما يكون الهدف هو استقرار الاستجابة عند قيمة محددة.
- الأعلى هو الأفضل (Higher is Better –HB): تُستخدم عندما يكون الهدف هو زيادة الاستجابة لتحقيق أداء أفضل.

* أنواع نسب الإشارة إلى الضوضاء:

تُحدد صيغة نسبة الإشارة إلى الضوضاء وفقاً لنوع الخاصية التي يتم تحليلها، ويتم حسابها باستخدام المعادلات التالية: [18]

• الأقل هو الأفضل (Lower is Better –LB):

تُحسب النسبة باستخدام العلاقة (11.2): [18]

$$S/ N_{LB} = -10 \log(\sum_{i=1}^r y_i^2) \dots\dots\dots (11.2)$$

r: عدد التكرارات أو الاختبارات في التجربة.

y_i: القيم الفردية لكل تكرار.

• القيمة الاسمية هي الأفضل (Nominal is Best –NB):

تُحسب هذه النسبة باستخدام طريقتين: [18]

- اعتمادًا على التباين فقط تحسب بالعلاقة (12.2):

$$S/N_{NB_1} = -10 \log V_e \dots\dots\dots (12.2)$$

- اعتمادًا على كل من المتوسط والتباين تحسب بالعلاقة (13.2):

$$S/N_{NB_2} = +10 \log \left(\frac{V_m - V_e}{rV_e} \right) \dots\dots\dots (13.2)$$

تساعد نسب الإشارة إلى الضوضاء في تقديم تحليل دقيق لمستوى التباين المرتبط بكل عامل، مما يساهم في تحسين استقرار وجودة العملية بشكل فعال. [18]

• الأعلى هو الأفضل (Higher is Better):

لحساب نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الحالات التي يكون فيها الهدف هو زيادة الأداء (الأعلى هو الأفضل)، يتم استخدام العلاقة (14.2): [18]

$$S/N_{HB} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right) \dots\dots\dots (14.2)$$

r: هو عدد التكرارات أو القياسات.

y_i: هي القيم الفردية لكل تكرار.

2.3.2. تحليل التباين (ANOVA) :

يُعد تحليل التباين (ANOVA) أداة هامة لفهم تأثير المعلمات المدخلة على النتائج التجريبية باستخدام طريقة تصميم التجارب في العمليات التشغيلية، كما يساعد في تفسير البيانات الناتجة. يعتمد تحليل التباين على تقسيم التباين الكلي في التجربة إلى مكونات تُنسب إلى العوامل المسيطر عليها والأخطاء الناتجة. يتم تقييم الأهمية الإحصائية للنماذج التربيعية باستخدام قيم p و F في جدول تحليل التباين. [19]

في جدول تحليل التباين: [19]

قيمة p هي احتمال (تتراوح من 0 إلى 1) أن تكون النتائج الملاحظة (أو نتائج أكثر تطرفاً) قد حدثت بالصدفة.

• إذا كانت قيمة p > 0.05 ، فإن العامل يُعتبر غير مهم.

• إذا كانت قيمة p ≤ 0.05 ، فإن العامل يُعتبر مهمًا.

يُستخدم المجموع التربيعي (SS_f) لتقدير مربع الانحراف عن المتوسط العام، ويتم حسابه باستخدام المعادلة

$$(15.2): [19]$$

$$SS_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \dots\dots\dots (15.2)$$

حيث:

\bar{y} : هو متوسط الاستجابات.

\bar{y}_i : هو متوسط الاستجابات المقاسة لكل مستوى من مستويات العامل.

N : هو إجمالي عدد التجارب .

N_{nf} : هو عدد مستويات كل عامل.

يتم حساب المتوسط التربيعي (MS_i) من خلال قسمة المجموع التربيعي على درجات الحرية، بحسب بالمعادلة (16.2): [19]

$$MS_i = \frac{SS_i}{df_i} \dots\dots\dots (16.2)$$

للتأكد من مدى ملاءمة النموذج، يتم استخدام مؤشر F-ratio ، حيث يجب أن تكون القيمة المحسوبة لـ F أكبر من القيم المستخلصة من جدول F ويعبر عنها بالعلاقة (17.2): [19]

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_e} \dots\dots\dots (17.2)$$

حيث: MS_e المجموع التربيعي للأخطاء.

يُعتبر النموذج ملائمًا عند مستوى ثقة 95% عندما تكون القيمة المحسوبة لـ F أكبر من القيمة الجدولية لـ F وعندما تكون قيم p أقل من 0.05 (أو عند مستوى ثقة 95%)، يعتبر النموذج ذو دلالة إحصائية، مما يعني أن العوامل المدرجة في النموذج لها تأثيرات مهمة على الاستجابات.

يُظهر العمود الأخير (Cont %) في جدول تحليل التباين مساهمة العامل (بالنسبة المئوية) في التباين الكلي، مما يدل على درجة تأثير العامل في النتيجة ويعبر عنه بالعلاقة (18.2): [19]

$$Cont\% = \frac{SS_f}{SS_T} \dots\dots\dots (18.2)$$

حيث: SS_T هو مجموع التباين الكلي.

3.3.2. تحليل الانحدار:

* تعريف:

تحليل الانحدار هو أحد أكثر التقنيات الإحصائية شيوعًا في العلوم الاجتماعية والسلوكية وكذلك في العلوم الفيزيائية، والذي يتضمن تحديد وتقييم العلاقة بين متغير تابع ومتغير مستقل واحد أو أكثر، والتي تسمى أيضًا متغيرات تنبؤية أو توضيحية. إنه مفيد بشكل خاص لتقييم وتعديل الالتباس. يتم افتراض نموذج للعلاقة وتستخدم تقديرات قيم المعلمات لتطوير معادلة انحدار مقدرة. ثم يتم استخدام اختبارات مختلفة لتحديد ما إذا كان النموذج مرضيًا. إذا تم اعتبار النموذج مرضيًا، يمكن استخدام معادلة الانحدار المقدرة للتنبؤ بقيمة المتغير التابع بالنظر إلى قيم المتغيرات المستقلة. يستكشف الانحدار الخطي العلاقات التي يمكن وصفها بسهولة بخطوط مستقيمة

أو تعميمها إلى العديد من الأبعاد. يمكن حل عدد كبير بشكل مدهش من المشكلات باستخدام الانحدار الخطي، وحتى أكثر من ذلك عن طريق تحويل المتغيرات الأصلية التي تؤدي إلى علاقات خطية بين المتغيرات المحولة. عندما يكون هناك متغير تابع مستمر واحد ومتغير مستقل واحد، يسمى التحليل "تحليل الانحدار الخطي البسيط". يفترض هذا التحليل وجود ارتباط خطي بين المتغيرين. الانحدار المتعدد هو لمعرفة المزيد عن العلاقة بين عدة متغيرات مستقلة أو تنبؤية ومتغير تابع أو معيار. المتغيرات المستقلة هي خصائص يمكن قياسها مباشرة، تسمى هذه المتغيرات أيضاً متغيرات تنبؤية أو توضيحية تستخدم للتنبؤ بسلوك المتغير التابع أو تفسيره، المتغير التابع هو سمة تعتمد قيمتها على قيم المتغيرات المستقلة. [20]

*** أهداف تحليل الانحدار:**

يستخدم تحليل الانحدار لشرح التباين في المتغير التابع بواسطة متغير مستقل واحد أو أكثر، وتحليل العلاقات بين المتغيرات للإجابة على سؤال مقدار تغير المتغير التابع مع تغييرات كل متغير مستقل، والتنبؤ بقيمة المتغير التابع بناءً على قيم المتغيرات المستقلة. الهدف الأساسي للانحدار هو تطوير علاقة خطية بين متغير الاستجابة والمتغيرات التفسيرية لأغراض التنبؤ، ويفترض وجود علاقة وظيفية خطية، وأن هناك طرق بديلة (الانحدار الوظيفي) أفضل. [20]

*** نموذج الانحدار البسيط:**

الانحدار الخطي البسيط هو طريقة إحصائية تسمح لنا بتلخيص ودراسة العلاقات بين متغيرين مستمرين (كميين). في علاقة السبب والنتيجة، يكون المتغير المستقل هو السبب، والمتغير التابع هو التأثير. يعد الانحدار الخطي بأقل المربعات طريقة للتنبؤ بقيمة متغير تابع y ، بناءً على قيمة متغير مستقل x . [20]

- متغير واحد، يرمز إليه بـ x ، يُعتبر متغيراً تنبؤياً أو توضيحياً أو مستقلاً.

- المتغير الآخر، المشار إليه بـ y ، يُعتبر متغير استجابة أو نتيجة أو تابعاً.

رياضياً، يتم تمثيل نموذج الانحدار بالمعادلة (19.2): [20]

$$Y = \beta_0 \pm \beta_1 x_1 \pm \epsilon \dots \dots \dots (19.2)$$

حيث:

X : متغير مستقل.

Y : متغير تابع.

β_1 : ميل خط الانحدار.

β_0 : نقطة تقاطع خط الانحدار مع المحور y .

يعبر عن β_0 و β_1 بالمعادلتين 20.2 و 21.2 على التوالي:

$$\beta_1 = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \dots\dots\dots (20.2)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \cdot \bar{x} \dots\dots\dots (21.2)$$

4.3.2. تحسين الاستجابة:

في العديد من التجارب، يكون هناك اهتمام بعدة استجابات في نفس الوقت. على سبيل المثال، تُعد عمليات تصنيع أشباه الموصلات والعمليات الكيميائية مثالين على العمليات الصناعية التي تتطلب من المهندسين التعامل مع استجابات متعددة. وتعتبر منهجية تحسين الاستجابة (Desirability Function) أداة فعالة لتحسين وتحليل التجارب التي تتضمن استجابات متعددة بحاجة إلى تحسين متزامن.

تم تطوير هذه المنهجية لأول مرة بواسطة هارينغتون (1965)، وتم تعديلها لاحقاً بواسطة ديرينغر وسويتش (1980). ومنذ ذلك الحين، أصبحت واحدة من أكثر الأساليب شيوعاً في تحسين الاستجابات المتعددة في التطبيقات العملية (ديرينغر، 1994). تعتمد الفكرة الأساسية لمنهجية تحسين الاستجابة على تحويل مشكلة الاستجابات المتعددة إلى مشكلة استجابة واحدة من خلال تطبيق تحويلات رياضية. [21]

يتم استخدام أدوات تصميم التجارب في جميع أساليب التحسين المتعدد لإنشاء علاقة رياضية بين المتغيرات المستقلة والاستجابات الناتجة. يمكن التعبير عن هذه العلاقة رياضياً بالمعادلة (22.2). [22]

$$Y_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_j) + \epsilon_i \dots\dots\dots (22.2)$$

تعتمد طريقة سطح الاستجابة (RSM) على هذه النمذجة، حيث تصيغ العلاقة في صورة دالة ثم تحلها ضمن نطاق محدد للحصول على القيم المثلى للمتغيرات والمدخلات. في أغلب الحالات، يتم استخدام نماذج خطية أو متعددة الحدود لتقريب هذه العلاقة. عندما تزداد تعقيدات النماذج أو عدد الاستجابات المطلوب تحسينها، تُعتبر وظائف تحسين الاستجابة خياراً مناسباً لأنها أكثر كفاءة من الناحية الحسابية. تشمل خطوات تحسين الاستجابات المتعددة باستخدام دالة الرغبة (Desirability Function) ما يلي: [22]

أولاً، يتم تحويل كل مستوى من مستويات الاستجابة المحددة إلى درجة تحسين تقع ضمن نطاق من 0 إلى 1 باستخدام علاقة رياضية ملائمة.

بعد ذلك، يتم دمج درجات التحسين التفاضلي الفردية في دالة تحسين إجمالية واحدة، يتم تحسينها للحصول على المجموعة المثلى من القيم للمتغيرات المدخلة.

تُعطى العلاقة الرياضية المدمجة للاستجابات بالمعادلة (23.2). [22]

$$\max D = (d_1(Y_1)^{k_1} \times d_2(Y_2)^{k_2} \times d_n(Y_n)^{k_n})^{\frac{1}{\sum_i k_i}} \dots\dots\dots (23.2)$$

حيث:

Y_i : مستوى الاستجابة i المحدد.

$d_i(Y_i)$: درجة التحسين المحولة للاستجابة المعنية.

k_i : الأهمية النسبية للاستجابة i مقارنةً بالاستجابات الأخرى.

تعظيم دالة التحسين التفضيلي الإجمالية D يعطي قيمة تتراوح بين 0 و 1، حيث يُفضّل أن تكون القيمة قريبة قدر الإمكان من 1. [22]

*** تحويل مستويات الاستجابة إلى درجات تحسين:**

يمكن تحقيق ذلك باستخدام دوال أسية. بينما يفضل في الممارسة استخدام التحويلات الخطية المرجحة (Weighted Linear Functions) التي اقترحها (Derringer and Suich) تُعد أكثر شيوعاً في التطبيقات العملية نظراً لمرونتها في تحديد المخاطر المرتبطة بالانحراف عن المستويات المرغوبة للاستجابات. [22] إذا كانت الاستجابة ذات طبيعة اسمية أو "القيمة المستهدفة هي الأفضل" يُقترح استخدام علاقة رياضية للتحسين تُصمم لتحقيق التوازن بين المستويات المستهدفة والانحرافات المقبولة، مع مراعاة درجة الأهمية النسبية لكل استجابة كما هو موضح في المعادلة 24.2: [22]

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & Y_i < LSL \\ \left(\frac{Y_i - LSL}{T - LSL}\right) & LSL \leq Y_i \leq T \\ \left(\frac{Y_i - USL}{T - USL}\right) & T \leq Y_i \leq USL \\ 0 & Y_i > USL \end{cases} \dots\dots\dots (24.2)$$

حيث إن LSL و USL هما الحدود الدنيا والعليا للمواصفات على التوالي، و T هو القيمة المستهدفة للاستجابة المرتبطة بـ Y_i . تشير الأسس s و t إلى الشكل الأساسي للاستجابة ضمن النطاق المحدد وكيفية التقيد بالقيمة المستهدفة المطلوبة. [22]

وبالمثل، عندما تكون الاستجابة المرغوبة هي التصغير، فإن النوع المناسب من دالة التحسين "كلما كان أصغر كان أفضل" يُستخدم كما هو موضح في المعادلة 25.2: [22]

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 1.0 & Y_i < LSL \\ \left(\frac{Y_i - USL}{LSL - USL}\right) & LSL \leq Y_i \leq USL \\ 0 & Y_i > USL \end{cases} \dots\dots\dots (25.2)$$

حيث LSL يصبح تلقائياً الحد الأدنى المطلوب. إنه الحد الأدنى العملي، وأي قيمة أقل من ذلك لن تحسن الاستجابة. [22]

وعندما تكون الاستجابة المرغوبة هي التعظيم، فإن النوع المناسب من دالة التحسين "كلما كان أكبر كان أفضل" يُستخدم كما هو موضح في المعادلة 26.2: [22]

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0 & Y_i < LSL \\ \left(\frac{Y_i - LSL}{USL - LSL}\right) & LSL \leq Y_i \leq USL \dots\dots\dots (26.2) \\ 1.0 & Y_i > USL \end{cases}$$

حيث USL يصبح تلقائياً الحد الأقصى المطلوب. إنه الحد الأعلى العملي، وأي قيمة أعلى من ذلك لن تحسن الاستجابة. [22]

4.2. خاتمة:

في هذا الفصل، تم تسليط الضوء على أهمية تحليل النتائج كجزء أساسي من أي دراسة أو تجربة علمية. بدأنا بتعريف مفهوم التجارب وطرق تصميمها، حيث تم شرح منهجيات تصميم التجارب بأسلوب منهجي ومنظم يضمن دقة البيانات وجودة النتائج. ومن بين هذه الطرق، تطرقنا إلى طريقة (Taguchi)، التي تعتمد على تحسين العمليات من خلال التحكم بالعوامل المؤثرة في الاستجابات. وتطرقنا أيضاً إلى منهجية سطح الاستجابة (Response Surface Methodology) واحدة من الأدوات الفعالة لتحديد النقطة المثلى التي تحقق أفضل أداء. كما تم شرح طريقة Box-Behnken، التي تعتبر من الأساليب المتقدمة لتحليل تأثير المتغيرات المختلفة وفهم التفاعل بينها. بالإضافة إلى ذلك، تناولنا تصميم المركب المركزي الذي يتيح دقة أكبر في التنبؤ والاستنتاج بناءً على تحليل شامل للمتغيرات. بعد ذلك، انتقلنا إلى شرح طرق تحليل النتائج المختلفة، والتي شملت، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (Signal-to-Noise Ratio) كأداة أساسية لتقييم استقرار النظام وتحسين الأداء. تحليل التباين (ANOVA) الذي يُعتبر من أكثر الأدوات شيوعاً لتحديد أهمية العوامل المؤثرة ودراسة دلالتها الإحصائية. تحليل الانحدار الذي يُستخدم لتحديد العلاقة بين المتغيرات وإيجاد نماذج رياضية تمثل هذه العلاقات. تحسين الاستجابة (Desirability Function) التي تُعدّ من الأدوات الفعالة لتحسين النتائج متعددة الاستجابات وضمان تحقيق الأهداف المرجوة.

يُشكل هذا الفصل قاعدة علمية صلبة تُبنى عليه كيفية انجاز التجارب وتحليل النتائج التي ستقدم في الفصول القادمة، مما يساهم في استكمال الدراسة بأسلوب علمي متكامل ومنهجي لتحقيق الأهداف المنشودة.

الفصل الثالث:

الجزء التجريبي

1.3. مقدمة:

في هذا الفصل، سنقوم بعرض شامل لتفاصيل التجارب التي أجريت من أجل مقارنة تطبيق ثلاث طرق تصميم التجارب الشائعة: طريقة تاغوشي، طريقة بوكس-بنكن، وتصميم المركب المركزي على دراسة تأثير شروط القطع على خشونة السطح، ودرجة حرارة القطع في الخرط الطولي لمادة الألمنيوم.

تم انجاز التجارب على مخرطة نصف آلية، وتم استخدام جهاز قياس خشونة السطح لقياس الخشونة، وكاميرا حرارية لقياس درجة حرارة القطع. في هذا الفصل سيتم تقديم وصف مفصل للمعدات التي تم استخدامها في إعداد وتنفيذ التجارب، جهاز قياس الخشونة، والكاميرا الحرارية، وخصائص المادة المشغلة.

2.3. عينات الاختبار:

تم استخدام عينات من مادة الألمنيوم في الاختبارات. وهي عبارة عن 4 قطع أسطوانية متطابقة الأبعاد. طول كل قطعة 170mm، وقطرها 20mm. العينات موضحة في الشكل 1.3.



الشكل 1.3: عينات الاختبار.

1.2.3. خصائص مادة الصنع:

عينات الاختبار مصنوعة من الألمنيوم A2017. الجدولان 1.3 و 2.3 يوضحان الخصائص الكيميائية والفيزيائية للألمنيوم A2017 المستخدم في هذه الدراسة.

الجدول 1.3: الخصائص الكيميائية.

العنصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
النسبة %	0.45	0.70	4.15	0.65	0.69	0.1	0.25	93.01

الجدول 2.3: الخصائص الفيزيائية.

الخاصية	قيمتها
الكثافة	2.79 g/cm ³
درجة الانصهار	510-640°C
معامل المرونة	72-74 GPa
نسبة الاستطالة	12%
التوصيل الحراري	130-160 W/m.K

3.3. الوسائل المستعملة:

1.3.3. آلة الخراطة المستعملة:

تم استخدام آلة الخراطة نصف الآلية من طراز TORNADO 230/1500 V ، كما هو موضح في الشكل 2.3 هذه الآلة من تصنيع شركة KNUTH الألمانية، وتتميز بقدرة تشغيلية تبلغ 5.5 kW مع سرعة دوران قصوى تصل إلى 3000 tr/min.

يُسهم استخدام آلة الخراطة نصف الآلية في تنفيذ التجارب بدقة وسهولة، مما يسمح بالتحكم الفعال في ظروف القطع وتحقيق دقة عالية في أبعاد العينة المختبرة. وتتميز هذه الآلة بالآلية تحكم تُمكن من ضبط سرعات الدوران المختلفة من خلال مجموعة من المقابض والأزرار.



الشكل 2.3: مخرطة نصف آلية.

تتميز هذه الآلة بإمكانية ضبط سرعات الدوران المختلفة للتحكم في عملية التشغيل بما يتناسب مع خصائص المادة المشغلة ومعايير الدقة المطلوبة، وذلك باستخدام ذراع التحكم الموضح في الشكل 3.3، بحيث لا تتجاوز

أقصى سرعة تشغيلية للآلة (3000 tr/min). كما يمكن مراقبة سرعة دوران الظرف ومعرفة قيم الإحداثيات المتعلقة بعملية القطع (أداة القطع وعمق القطع) من خلال شاشة التحكم الموضحة في الشكل 4.3.



الشكل 3.3: مقبض اختيار سرعة الدوران.



الشكل 4.3: لوحة التحكم.

تعتمد عملية إدخال قيم سرعة التغذية في آلة الخراطة النصف آلية Tornado 230/1500V على الضبط اليدوي باستخدام آلية التحكم بالمقايض الموضحة في الشكل 5.3. يتم تحديد قيم التغذية المناسبة بالاعتماد على الجدول التقني الملصق بالآلة المبين في الشكل 6.3 والذي يحتوي على قيم التغذية المتاحة في عمليات الخراطة.



الشكل 5.3: مقابض التحكم في سرعة التغذية.

LEAD SCREW CROSS FEED ROD P=6 mm P=4 mm

54T 55T 56T 64T 40T

(V)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
II CFS	0.1									
II CES	0.2	0.25								0.30
II CDS	0.4	0.45	0.5	0.55					0.6	0.65
II CEU										0.75
I CFS	0.8	0.9								
II CDU	1		1.25						1.5	1.75
I CFU	2	2.25	2.5	2.75				3	3.25	3.5
I CEU	4	4.5	5	5.5				6	6.5	7
I CDU	8	9	10	11	12	13	14			
II AER	54	72	76	80	88	92	96	104	108	112
II AFR	32	36	38	40	44	46	48	52	54	56
II BFR	18	18	19	20	22	23	24	26	27	28
I AER	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	13.5	14
I AFR	4	4.5	4.5	5	5.5	5.5	6	6.5	6.5	7
I BFR	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3.5	3.5	3.5
II CES	0.1									
II CDS	0.2		0.25							0.30
I CES	0.4	0.45	0.5	0.55					0.6	0.65
II CDU										0.75
I CES	0.8	0.9								
I CFU	1		1.25						1.5	1.75
I CEU	2	2.25	2.5	2.75				3	3.25	3.5
I CDU	4	4.5	5	5.5				6	6.5	7
II AFR	64	72	76	80	88	92	96	104	108	112
II BFR	32	36	38	40	44	46	48	52	54	56
I AFR	18	18	19	20	22	23	24	26	27	28
I BFR	8	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	13.5
I AFR	4	4.5	4.5	5	5.5	5.5	6	6.5	6.5	7
I BFR	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3.5	3.5	3.5
LEVER	1	2	4	6	7	8	10			
II CFT	0.031	0.034	0.038	0.041	0.045	0.048	0.054	0.058	0.062	0.066
II CET	0.062	0.068	0.076	0.082	0.088	0.096	0.106	0.112	0.118	0.124
II CDT	0.124	0.136	0.152	0.164	0.180	0.196	0.212	0.232	0.248	0.264
I CFT	0.248	0.272	0.304	0.328	0.360	0.392	0.424	0.464	0.496	0.528
I CET	0.496	0.544	0.608	0.656	0.720	0.784	0.848	0.912	0.976	1.040
I CDT	0.912	1.008	1.120	1.216	1.312	1.440	1.568	1.700	1.832	1.960
II CFT	0.014	0.016	0.017	0.019	0.021	0.023	0.024	0.026	0.028	0.030
II CET	0.028	0.031	0.035	0.038	0.042	0.046	0.050	0.054	0.058	0.062
II CDT	0.056	0.062	0.070	0.077	0.084	0.091	0.098	0.106	0.114	0.122
I CFT	0.112	0.125	0.140	0.154	0.168	0.184	0.200	0.216	0.232	0.248
I CET	0.224	0.250	0.280	0.308	0.336	0.364	0.392	0.420	0.448	0.476
I CDT	0.448	0.500	0.560	0.616	0.672	0.728	0.784	0.840	0.896	0.952

الشكل 6.3: جدول قيم التغذية.

2.3.3. أدوات القطع:

* أداة التعقيم:

تم تنفيذ عملية التعقيم بهدف فصل عينات التجارب المراد إجراء عمليات الخراطة الطولية عليها، بحيث يبلغ طول كل عينة 30mm لضمان دقة التجارب وتحقيق أفضل النتائج. من أجل القيام بعملية التعقيم استخدمنا حامل الأداة ADKT6L62525636T12. الموضح في الشكل 7.3.



الشكل 7.3: أداة التعقيم.

* أداة الخراط الطولي:

في عملية الخراط الطولي استخدمنا حامل الأداة المبين في الشكل 8.3. والذي يحمل الترميز رقم .MWLN2525M08.

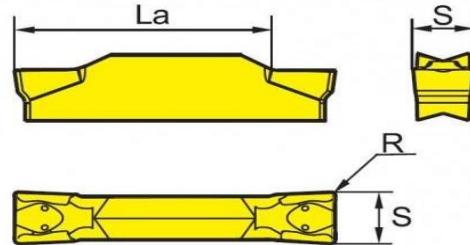


الشكل 8.3: أداة الخراط الطولي.

3.3.3. لقم الأدوات:

* لقم التعنيق:

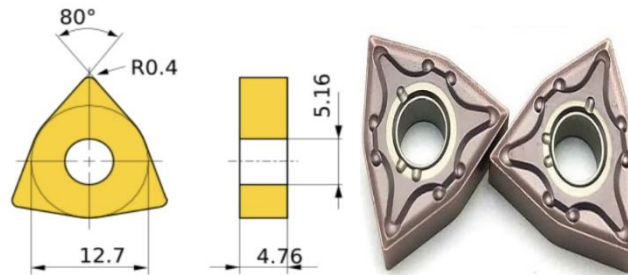
لقم الأداة المستخدمة في التعنيق المبين في الشكل 9.3 قابل للإزالة ومصنوع من الكريبد. ذو التعيين .ZTFD0303-MGYBG302.



الشكل 9.3: لقم التعنيق.

* لقم الخراط الطولي:

لقم الأداة المستخدمة في الخراط الطولي المبين في الشكل 10.3 قابل للإزالة ومصنوع من الكريبد. ذو التعيين .WNMG080404-MA.



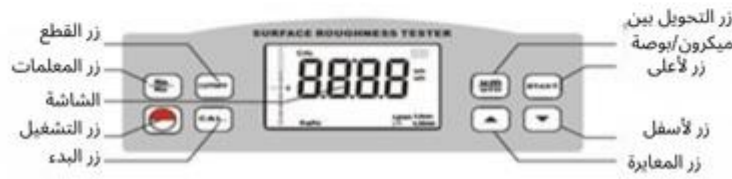
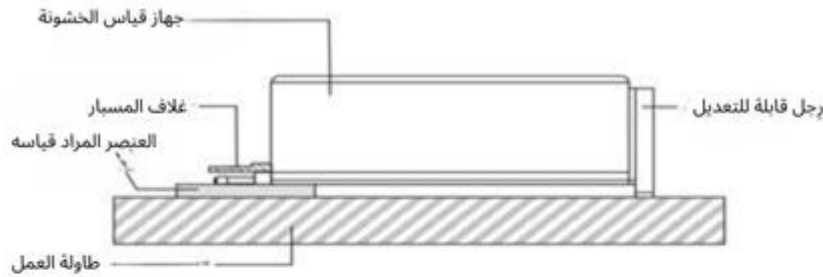
الشكل 10.3: لقم الخراط الطولي.

4.3.3. جهاز قياس خشونة:

يعتبر جهاز RT-PCE1200 المبين في الشكل 11.3 أداة دقيقة وسهلة الاستخدام لقياس خشونة الأسطح. يتكون الجهاز من قلم قياس صغير وحساس يتحرك على سطح العينة المراد قياسها. يعتمد الجهاز على تقنيات الاهتزاز والاستجابة الكهرومغناطيسية لتحديد مستوى الخشونة، ويعرض البيانات على شاشة LCD، مما يسمح للمستخدم بتخزين القراءات وتحليلها. ويتمتع الجهاز بعدة مزايا تجعله مناسباً للتطبيقات الصناعية ومراقبة الجودة، من بينها:

- دقة قياس عالية تصل إلى 0.001 ميكرون.
- سهولة النقل والاستخدام حيث يتميز الجهاز بحجمه الصغير وإمكانية تشغيله بالبطارية.
- تعدد المعايير القياسية إذ يدعم قياس الخشونة وفقاً لمعايير ISO، DIN، ANSI، JIS.

- عرض البيانات بوضوح عبر شاشة LCD مضاءة، تسهل قراءة النتائج وتحليلها.
- إمكانية تخزين البيانات وتحليلها باستخدام برنامج PCE-Surf.



الشكل 11.3: مكونات جهاز قياس الخشونة.

5.3.3. جهاز قياس الحرارة:

تم استخدام كاميرا التصوير الحراري FLIR T650Sc المبنية في الشكل 12.3 لقياس درجة حرارة القطع أثناء عمليات التشغيل، وهي كاميرا متطورة من إنتاج شركة FLIR Systems. تتميز بدقة 480×640 بكسل، مع نطاق تشغيل حراري يتراوح بين 40°C إلى 2000°C . مما يسمح بالحصول على صور حرارية واضحة ومفصلة. تدعم التصحيح التلقائي للصورة باستخدام تقنية MSX، والتي تحسن وضوح الصورة الحرارية. وتتميز باستجابة سريعة للقياس مما يتيح استخدامها في التجارب الديناميكية في وضع تسجيل الفيديو.



الشكل 12.3: كاميرا التقاط درجة الحرارة.

4.3. تحضير العينة:

يهدف هذا العمل التجريبي إلى قياس خشونة السطح ودرجة حرارة القطع أثناء عملية الخراط الطولي على أسطوانات الألمنيوم. حيث قمنا بتقسيم العينة إلى أربع أجزاء متساوية باستخدام القنوية. كما هو موضح في الشكل 13.3. تم إنشاء عنق يفصل بين كل عينة، طول العنق 5مم. هذا التقسيم يمكننا من إجراء التجارب بشكل دقيق وفحص الخصائص السطحية لكل جزء.



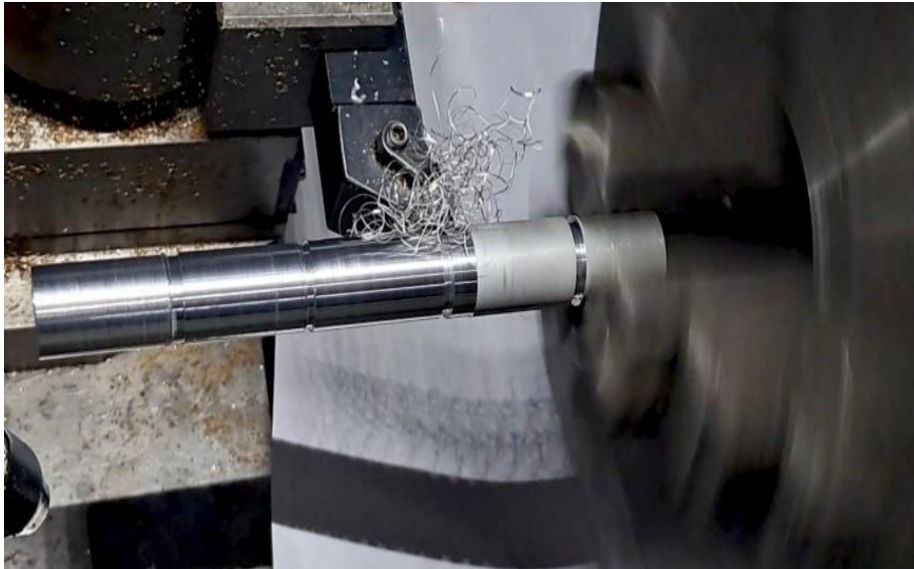
الشكل 13.3: عملة قياس الطول.

تم ضبط الآلة على سرعة دوران معينة لإنجاز عملية تسوية باستخدام أداة خراط منحنية. عند الانتهاء من العملية، تم إيقاف الظرف لتغيير أداة الخراط المنحنية بأداة تعنيق، من أجل إنجاز التعنيق الذي يفصل بين عينات التجارب. بعد تركيب الأداة، تم إعادة تشغيل الآلة بسرعة دوران وتغذية مضبوطة، وضبط الأداة في موضع التشغيل لإنجاز العنق. تكرر هذه العملية على طول أربع أسطوانات من الألمنيوم. بعد إجراء عملية التعنيق يصبح لدينا أربع عينات مختلفة في الأسطوانة الواحدة يمكن فحصها. الشكل 14.3 يوضح أحد قضبان الألمنيوم بعد عملية التسوية والتعنيق.



الشكل 14.3: عملية التعنيق.

بعد الانتهاء من عملية التعنيق، تم إيقاف الظرف وتغيير أداة التعنيق بأداة الخرط الطولي. بعدها تم إعادة تشغيل الآلة حسب شروط القطع المطلوبة في التجربة، يتم تغيير الشروط حسب كل تجربة. الشكل 15.3 يوضح عملية الخرط الطولي لأحد العينات. يوضح الشكل 16.3 الشكل النهائي لعينة الاختبار.



الشكل 15.3: عملية الخرط الطولي.



الشكل 16.3: الشكل النهائي لعينة الاختبار.

5.3. عمليات القياس:

1.5.3. عمليات قياس درجة الحرارة:

- قمنا بتشغيل الكاميرا باستخدام زر الطاقة.
- استخدمنا واجهة الشاشة لتحديد الإعدادات المطلوبة، مثل الدقة ونوع الوضع (أسود وأبيض أو ملون).
- تحميل الوثائق.
- وضعنا الوثائق التي نريد تصويرها على السطح الزجاجي للماسح الضوئي.
- قمنا بتحديد مكان حفظ الملفات المسوحة ضوئياً في مجلد محدد.
- بدأنا عملية التصوير باختيار الخيار المناسب على واجهة التحكم والضغط على زر الفحص أو التصوير.
- راقبنا عملية التصوير للتأكد من جودة الصور المسوحة ضوئياً.

- قمنا بتحرير الصور بواسطة البرنامج المرفق بالكاميرا.
 - حفظ الصور الممسوحة ضوئياً في المكان المحدد.
 - بعد الانتهاء، قمنا بإيقاف تشغيل الكاميرا وفصلها عن مصدر الطاقة.
- أثناء التصوير بالكاميرا الحرارية، يتم التركيز على منطقة التماس بين الأداة والشغلة، لأنها تمثل المنطقة التفاعلية، وبالتالي الحرارة الموجودة في هذه المنطقة تمثل حرارة القطع.

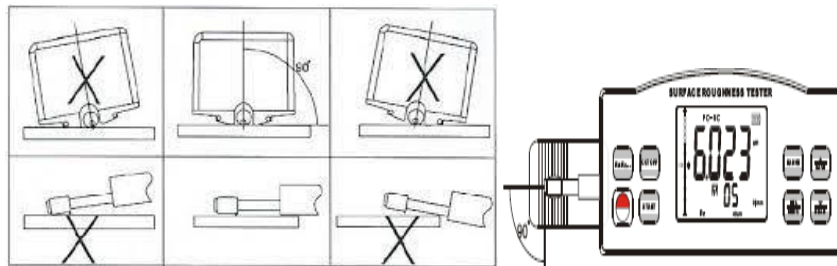
2.5.3. عملية قياس الخشونة:

- عملية قياس الخشونة تتم على عدة مراحل، وهي بالترتيب، موضحة كما يلي:
- تشغيل الجهاز مع التأكد من شحن البطارية.
 - التأكد أن الجهاز صالح، وذلك بتمرير مستشعر الجهاز على عينة خاصة بالجهاز معلومة الخشونة، مثل ما هو موضح في الشكل 17.3.



الشكل 17.3: عملية التحقق من صلاحية جهاز قياس الخشونة.

- نزع العينة من آلة الخراطة ثم تحضير السطح الذي نرغب في قياس خشونته، حيث يجب أن يكون السطح نظيفاً.
- وضع العينة على طاولة مسطحة، كما يجب أن يوضع الجهاز بطريقة صحيحة على السطح المراد قياس خشونته، كما هو موضح في الشكل 18.3.



الشكل 18.3: طريقة تموضع الجهاز الصحيحة.

- بعد التحقق من التموضع الصحيح لكل من العينة وجهاز قياس الخشونة، نقوم بعملية القياس، الشكل 19.3.



الشكل 19.3: عملية قياس الخشونة.

- قمنا بوضع المستشعر على السطح المراد قياسه، حيث يجب أن يكون في اتصال مباشر مع سطح العينة.
- بعد الانتهاء من الخطوة السابقة، نضغط على زر بدء القياس، فيبدأ الجهاز في قياس الخشونة.
- يبدأ الجهاز في تحويل الخشونة الموجودة على السطح إلى قراءات رقمية.
- تدوين القراءات المحصلة من طرف الجهاز.

6.3. خاتمة:

تناول هذا الفصل بالتفصيل جميع التجارب المنجزة، بدءاً من آلة الخراطة وضبط شروط القطع، مروراً بتجهيز العينات وإجراء الاختبارات، وصولاً إلى عمليات القياس. كما تم استعراض الأدوات والمعدات المستخدمة، مثل آلة الخراطة وأدوات القطع وأجهزة القياس المختلفة، مع توضيح طرق عملها ودورها في تحقيق نتائج دقيقة. إضافةً إلى ذلك، تم التطرق إلى وسائل القياس مثل جهاز قياس الخشونة وكاميرا التصوير الحراري، مما ساهم في الحصول على بيانات موثوقة تعكس تأثير شروط القطع على جودة السطح ودرجة حرارة القطع.

الفصل الرابع:

نتائج وتحليل

1.4. مقدمة:

يتناول هذا الفصل تحليل النتائج التجريبية المنجزة بالاعتماد على التصاميم التجريبية بهدف المقارنة بين هذه التصاميم في دراسة تأثير متغيرات القطع الرئيسية - وهي سرعة القطع، وعمق القطع، والتغذية - على كل من خشونة السطح ودرجة حرارة القطع أثناء الخراطة الطولية لمادة الألمنيوم. وقد تم اعتماد ثلاث منهجيات لتصميم التجارب، وهي: تصميم تاغوشي (Taguchi)، وتصميم بوكس-بنكن (Box-Behnken)، وتصميم المركب المركزي (Central Composite Design - CCD)، وذلك ضمن إطار منهجية تحليل الاستجابة (RSM). تم إجراء التجارب وتحليل المعطيات باستخدام أدوات إحصائية دقيقة، شملت تحليل التباين (ANOVA) لتحديد الأثر النسبي لكل عامل، وتحليل الانحدار لتكوين نماذج رياضية قادرة على التنبؤ بالاستجابات، بالإضافة إلى تطبيق استراتيجيات تحسين الاستجابة لاستخلاص الشروط التشغيلية المثلى، وذلك باستعمال برنامجين Design Expert وMinitab 18. يهدف هذا الفصل إلى مقارنة شاملة بين المنهجيات الثلاث من حيث الكفاءة التجريبية والدقة الإحصائية والقدرة على التحسين.

2.4. وصف التجربة:

للمقارنة بين المنهجيات الثلاثة (تصميم تاغوشي، وتصميم بوكس-بنكن، وتصميم المركب المركزي) في دراسة تأثير شروط القطع على خشونة السطح (Ra)، ودرجة حرارة القطع (Tc)، أثناء عملية الخراطة الطولية لمادة الألمنيوم، تم اختيار ثلاثة عوامل رئيسية: سرعة القطع (Vc)، التغذية (f)، وعمق القطع (ap)، بحيث تتغير هذه العوامل وفقاً لثلاثة مستويات مختلفة. تم تنفيذ التجارب باستخدام الخراطة الطولية، حيث تم قياس خشونة السطح، ودرجة حرارة القطع لكل تجربة. يوضح الجدول 1.4 مستويات شروط القطع المختارة للتجارب.

الجدول 1.4: شروط القطع ومستوياتها.

Niveaux	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/tr)
1	30	0,25	0,05
2	80	0,5	0,15
3	130	0,75	0,25

3.4. تطبيق تصميم Taguchi:

تُعد طريقة تاغوشي أداة فعالة ومستخدمة على نطاق واسع في تحسين جودة المنتجات، حيث تسهم في تطوير العمل التجريبي من خلال تقليل عدد التجارب المطلوبة لتحديد وتحسين ظروف القطع مع الحفاظ على موثوقية

النتائج، وذلك بالاعتماد على المصفوفات المتعامدة. وفي هذا السياق من أجل مقارنتها مع كل من طريقة Box Behnken وطريقة تصميم المركب المركزي (CCD) بهدف اختيار شروط القطع المثلى التي سيتم استخدامها في تشغيل الألمنيوم من أجل الحصول على أقل خشونة سطح وأقل درجة حرارة قطع، تم تصميم التجارب بتغيير ثلاث عوامل وثلاثة مستويات لكل عامل، بتطبيق المصفوفة المتعامدة (3^3) Taguchi L9. ويعني ذلك أنه من أجل دراسة تأثير ثلاث متغيرات لظروف القطع عبر ثلاث مستويات يكفي إجراء 9 تجارب فقط.

الجدول 2.4: تصميم التجارب بالاعتماد على منهجية تاغوشي ونتائج كل من Ra و Tc.

N°	Vc (mm/min)	ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (μm)	Tc (C°)
1	30	0,25	0,05	0,442	47,2
2	30	0, 5	0,15	1,963	52,7
3	30	0,75	0,25	4,756	61,3
4	80	0,25	0,15	1,198	55,1
5	80	0, 5	0,25	3,791	58,5
6	80	0,75	0,05	1,965	75,6
7	130	0,25	0,25	3,625	59,8
8	130	0, 5	0,05	2,076	71,9
9	130	0,75	0,15	3,152	80,8

تم قياس النتائج الخاصة بكل من خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة القطع (Tc) لكل تجربة والتي تم استخدامها في التحاليل. الجدول 2.4 يبين خطة التجارب بالاعتماد على المصفوفة L9 ونتائج كل من Ra و Tc.

1.3.4. تحليل النتائج الخاصة بخشونة السطح (Ra):

* تحليل التباين ANOVA:

هدفت هذه الدراسة إلى تحديد تأثير شروط القطع على متوسط الخشونة الحسابي (Ra)، وذلك باستخدام تحليل التباين (ANOVA) بمستوى ثقة 95%. تم اختبار أهمية عوامل التحكم في تحليل التباين من خلال مقارنة القيم الاحتمالية (p-value) الخاصة بكل عامل.

أظهرت النتائج أن لكل عامل من عوامل القطع تأثيراً ملحوظاً على الاستجابة المقاسة، ويتجلى ذلك من خلال القيمة الإحصائية (F) والنسبة المئوية للمساهمة (Contribution%) لكل عامل. إذ تعكس النسبة المئوية للمساهمة مدى تأثير العوامل على النتائج، فكلما ارتفعت هذه النسبة، زاد تأثير العامل على المعلمات المدروسة. تشير القيم الاحتمالية (p-value) التي تقل عن 0.05 إلى أن العامل ذو تأثير كبير.

يظهر الجدول 3.4 نتائج تحليل التباين لتأثير شروط القطع على معيار الخشونة (Ra)، حيث يتضح أن أكثر العوامل تأثيراً على (Ra) هي التغذية التي تساهم بنسبة 71.19%. يأتي بعدها عمق القطع بنسبة مساهمة تبلغ 23.53%، مما يجعله ثاني أكثر العوامل تأثيراً، كما أن p-value الخاص بهما أقل من 0.05. في حين أن سرعة القطع Vc لا يمكنها المساهمة في مقاييس الأداء لأن قيمة p-value الخاص بها تجاوزت 0.05 وهذا ما أكدته نسبة مساهمة هذا العامل التي بلغت 4.79% وهي نسبة صغيرة مقارنة بنسبة مساهمة التغذية وعمق القطع.

الجدول 3.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra).

Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc	2	0,7235	4,79	0,7235	0,36177	9,69	0,094
ap	2	3,5541	23,53	3,5541	1,77704	47,62	0,021
f	2	10,7553	71,19	10,7553	5,37764	144,09	0,007
Error	2	0,0746	0,49	0,0746	0,03732		
Total	8	15,1075	100				

* تحليل الانحدار *Analyse de Régression*:

النموذج الرياضي للاستجابة (Ra) يعطى بالمعادلة (1.4).

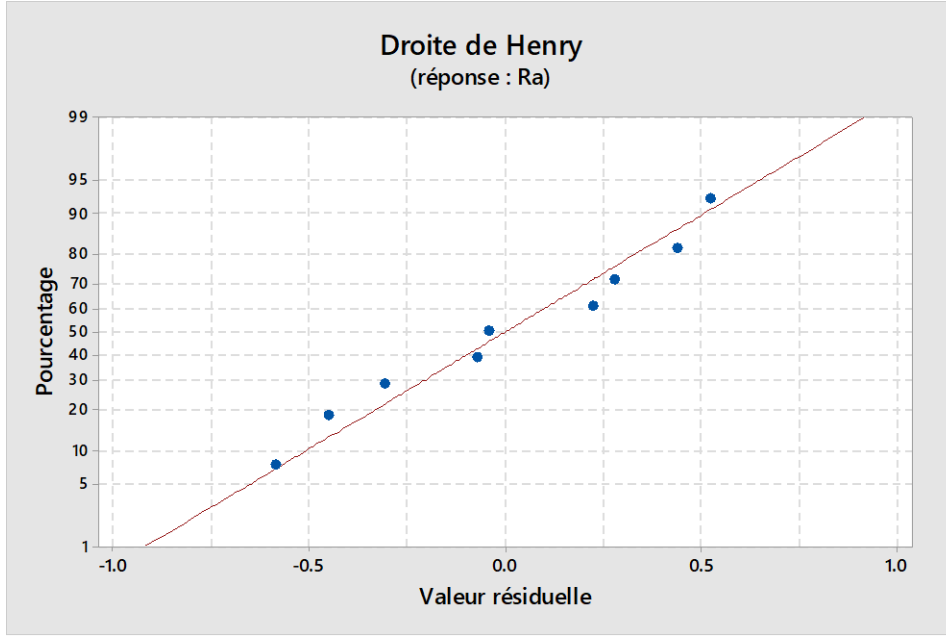
$$Ra = -1,357 + 0,00564 Vc + 3,072 ap + 12,82 f \dots\dots\dots(1.4)$$

الجدول 4.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,497596	91,81%	86,89%	4,49747	70,23%

في هذه الدراسة، تم استخدام نموذج الانحدار الخطي لتحليل العوامل المؤثرة على متوسط الخشونة الحسابي (Ra) في ظل ظروف قطع مختلفة. وتم قياس دقة النموذج من خلال معامل التحديد (R^2)، الذي يعكس مدى

توافق القيم المتنبأ بها مع البيانات الفعلية. كما هو موضح في الجدول 4.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لمتوسط الخشونة (Ra) معامل تحديد قدره 91.81% وهي نسبة جيدة جداً. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي.



الشكل 1.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

تتم مقارنة القيم المتوقعة للنموذج المتحصل عليها بالبيانات التجريبية، حيث تُظهر النتائج توافقاً جيداً بين القيم التجريبية والتنبؤات. وبناءً على ذلك، يمكن اعتبار النموذج المطور أكثر دقة وملاءمة للتنبؤ بمتوسط الخشونة الحسابي (Ra).

يمثل الشكل 1.4 مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، والتي تُستخدم في تحليل الانحدار لتقييم مدى توافق البيانات مع النموذج الاحتمالي. في هذا المخطط، الذي يتبع توزيعاً طبيعياً، نلاحظ أن القيم التجريبية الممثلة بنقاط في المخطط قريبة من القيم النظرية الممثلة بالخط المستقيم الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج.

2.3.4. تحليل النتائج الخاصة بدرجة حرارة القطع (Tc):

* تحليل التباين ANOVA:

يظهر الجدول 5.4 نتائج تحليل التباين لدرجة حرارة القطع (Tc)، حيث نلاحظ أن أكثر العوامل تأثيراً على (Tc) هو عمق القطع ap، الذي يساهم بنسبة 52.32%، تليه سرعة القطع Vc والتي ساهمت بنسبة 43.79% أي أنها ثاني أكثر العوامل تأثيراً، في حين أن التغذية f تساهم بنسبة ضئيلة جداً تبلغ 3.83% فقط.

الجدول 5.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc).

Source	DF	Seq SS	Contribution %	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc	2	439,84	43,79%	439,842	219,921	677,84	0,001
ap	2	525,50	52,32%	525,502	262,751	809,85	0,001
f	2	38,47	3,83%	38,469	19,234	59,28	0,017
Error	2	0,65	0,06%	0,649	0,324		
Total	8	1004,46	100,00%				

* تحليل الانحدار *Analyse de Régression*:

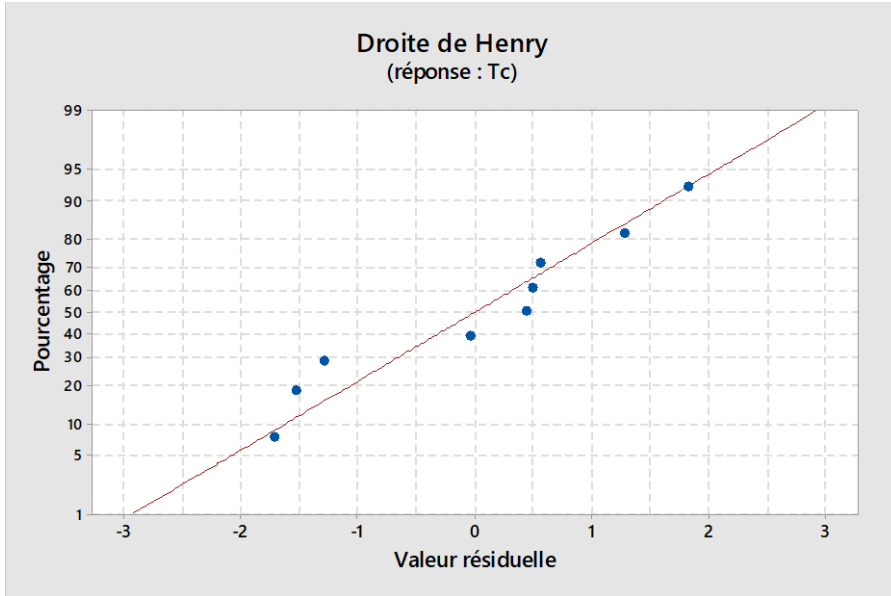
النموذج الرياضي للاستجابة (Tc) يعبر عنه بالمعادلة (2.4).

$$Tc = 34,11 + 0,1710 Vc + 37,07 ap - 25,17 f \dots\dots\dots(2.4)$$

الجدول 6.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
1,58864	98,74%	97,99%	33,0420	96,71%

كما هو موضح في الجدول 6.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لحرارة القطع (Tc) معامل تحديد عالي قدره 98.74%. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي. يمثل الشكل 2.4 مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، نلاحظ أن النقاط التي تمثل القيم التجريبية قريبة من الخط المستقيم الممثل باللون الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج الرياضي المقترح.



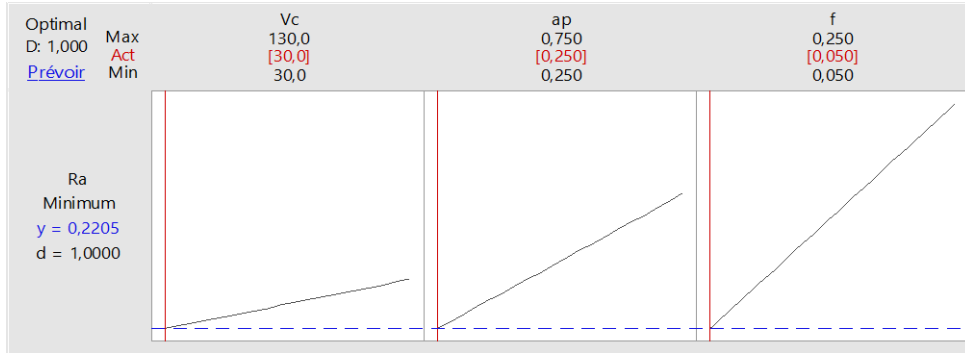
الشكل 2.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

3.3.4. تحسين الاستجابة Response Optimisation:

من أجل تحديد شروط القطع المثلى التي تؤدي إلى تقليل كل من خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة التشغيل، يتم استخدام أداة تحسين الاستجابة (Response Optimization) في برنامج Minitab 18. تعتمد عملية التحسين على تحديد القيم المثالية للمتغيرات المستقلة، وهي: سرعة القطع (Vc)، التغذية (f)، وعمق القطع (ap)، والتي تساهم في الحصول على أقل قيمة ممكنة لكل من الخشونة (Ra) ودرجة الحرارة (Tc). يُعد هذا التحسين خطوة أساسية ضمن أهداف هذا العمل، حيث يهدف إلى إيجاد أفضل شروط للقطع أثناء خراطة الألمنيوم لتحسين جودة السطح وتقليل الحرارة المتولدة ومقارنة التحسينات المقترحة من طرق تصميم التجارب الثلاثة. كما سيتم إنشاء رسم بياني يوضح نتائج عملية التحسين ويمثل القيم المثلى للمتغيرات التي تحقق أفضل أداء للاستجابات.

* تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra):

تشير البيانات الممثلة في الشكل 3.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة للخشونة السطحية (Ra) هي: سرعة قطع تبلغ $Vc = 30 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $ap = 0,25 \text{ mm}$ ، وتغذية تساوي $f = 0,05 \text{ mm/tr}$. تم تمثيل هذه القيم باللون الأحمر في الجزء العلوي من مخطط التحسين، حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف سلوك الخشونة السطحية. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ (Ra) فقد بلغت $0,2205 \mu\text{m}$ ، وتم تمثيلها باللون الأزرق في الرسم التخطيطي.



الشكل 3.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra).

* تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc):

تشير البيانات الممثلة في الشكل 4.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة لدرجة الحرارة (Tc) هي: سرعة قطع تبلغ $Vc = 30 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $ap = 0,25 \text{ mm}$ ، وتغذية تساوي $f = 0,25 \text{ mm/tr}$. تم تمثيل هذه القيم باللون الأحمر في الجزء العلوي من مخطط التحسين، حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف الاستجابات المختلفة. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ (Tc) فقد بلغت $42,2111 \text{ }^\circ\text{C}$ ، وتم تمثيلها باللون الأزرق في الرسم التخطيطي.



الشكل 4.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc).

4.4. تطبيق تصميم Box Behnken:

تم استخدام طريقة Box Behnken لأنها تعتبر أداة جودة لتحسين العمل التجريبي باستخدام عدد أقل من التجارب مع الحفاظ على موثوقية النتائج. تم بالاعتماد على منهجية Box Behnken تصميم 17 تجربة سيتم إنجازها من أجل تحقيق الأهداف المرجوة. تم قياس النتائج الخاصة بكل من خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة القطع (Tc) لكل تجربة. تطبيق منهجية بوكس-بنكن ونتائج كل من Ra و Tc موضحة في الجدول 7.4.

الجدول 7.4: تصميم التجارب وفق box-behnken ونتائج كل من Ra و Tc.

N°	Vc (mm/min)	ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (µm)	Tc (°C)
1	30	0,25	0,15	1.174	66.6
2	130	0,25	0,15	1.924	69.5
3	30	0,75	0,15	1.81	95.9
4	130	0,75	0,15	3.152	80.8
5	30	0,50	0,05	1.329	75.6
6	130	0,50	0,05	2.076	71.9
7	30	0,50	0,25	4.866	88.7
8	130	0,50	0,25	5.56	89.8
9	80	0,25	0,05	0.901	56.3
10	80	0,75	0,05	1.965	75.6
11	80	0,25	0,25	3.309	71.9
12	80	0,75	0,25	6.846	112.8
13	80	0,50	0,15	2.277	79.3
14	80	0,50	0,15	2.26	82.6
15	80	0,50	0,15	2.279	84.1
16	80	0,50	0,15	2.135	83.7
17	80	0,50	0,15	2.065	82.9

1.4.4. تحليل النتائج الخاصة بخشونة السطح (Ra):

* تحليل التباين ANOVA:

يظهر الجدول 8.4 نتائج تحليل التباين لتأثير شروط القطع على معيار الخشونة (Ra)، حيث يتبين لنا أن العامل الأكثر تأثيراً على خشونة السطح (Ra) هو التغذية f ، التي تساهم بنسبة 62.97% و p-value منخفض جداً يدل على تأثيره الكبير والمعنوي. يأتي بعدها التفاعل f^2 الذي ساهم بنسبة 16.11%، ثم عمق القطع بنسبة 12.84%، أي أن تأثيرهما متوسط نوعاً ما، وأخيراً سرعة القطع (Vc) والتفاعل بين العوامل f و

ap لا تتجاوز نسبة المساهمة لكل منهما 4% أي تأثيرهما ضئيل جدا. أما باقي التفاعلات ليس لهم تأثير لأن p-value الخاص بهم أكبر من 0.05.

الجدول 8.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Contribution%	F-value	p-value
Model	40.64	9	4.52		30.50	< 0.0001
A-Vc	1.56	1	1.56	3.84%	10.54	0.0141
B-ap	5.22	1	5.22	12.84%	35.28	0.0006
C-f	25.60	1	25.60	62.97%	172.87	< 0.0001
AB	0.0876	1	0.0876	0.22%	0.5917	0.4669
AC	0.0007	1	0.0007	0.017%	0.0047	0.9470
BC	1.53	1	1.53	3.76%	10.33	0.0148
A ²	0.0002	1	0.0002	0.005%	0.0015	0.9707
B ²	0.1607	1	0.1607	0.40%	1.09	0.3322
C ²	6.55	1	6.55	16.11%	44.25	0.0003
Residual	1.04	7	0.1481			
Lack of Fit	0.9983	3	0.3328		34.87	0.0025
Pure Error	0.0382	4	0.0095			
Cor Total	41.68	16		100%		

* تحليل الانحدار *Analyse de Régression*:

النموذج الرياضي للاستجابة (Ra) يعطى بالمعادلة (3.4).

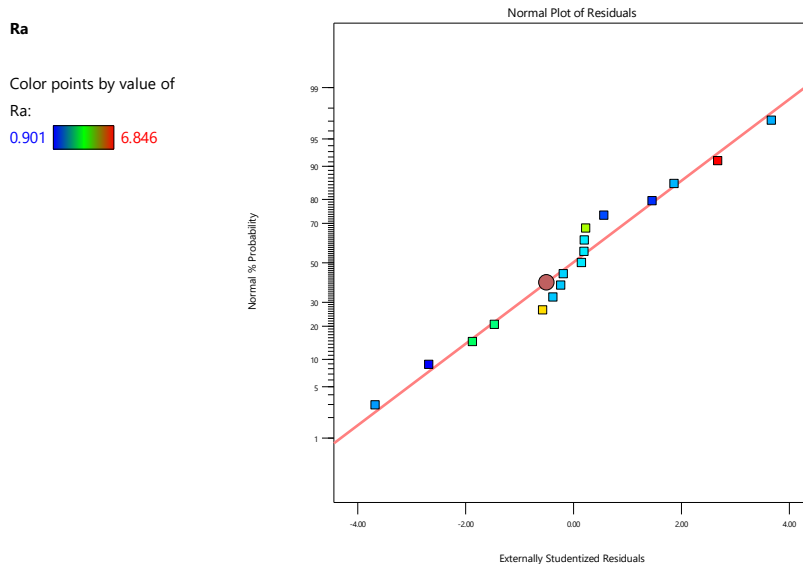
$$Ra = 1,53733 + 0,002852Vc + 1,70140ap - 31,68750f + 0,011840Vcap - 0,002650Vcf + 24,73 apf + 0,0033Vc^2 \dots\dots\dots (3.4) - 3,12560ap^2 + 124,74000f^2$$

الجدول 9.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

Std. Dev.	0.3848	R²	0.9751
Mean	2.70	Adjusted R²	0.9432
C.V. %	14.24	Predicted R²	0.6153
		Adeq Precision	18.8293

كما هو موضح في الجدول 9.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لمتوسط الخشونة (R_a) معامل تحديد قدره 97.51% وهي نسبة جيدة جدا. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي.

يمثل الشكل 5.4 مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، نلاحظ أن النقاط التي تمثل القيم التجريبية قريبة من القية النظرية الممثلة بالخط الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج.



الشكل 5.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

2.4.4. تحليل النتائج الخاصة بدرجة حرارة القطع (T_c):

* تحليل التباين ANOVA:

يمثل الجدول 10.4 نتائج تحليل التباين لدرجة حرارة القطع (T_c)، حيث يتضح أن العامل الأكثر تأثيراً على (T_c) هو عمق القطع a_p ، الذي يساهم بنسبة 52.26%، تأتي بعده التغذية f بنسبة 36.10% وتعتبر ثاني أكثر العوامل تأثيراً، وأخيراً التفاعل بين العوامل f و a_p بنسبة مساهمة ضئيلة جداً تبلغ 4.80%، كما أن p -

value الخاص بهم أقل من 0.05. في حين أن سرعة القطع Vc وباقي التفاعلات بين العوامل لا يمكنهم المساهمة في قيم Tc لأن قيمة p-value الخاص بهم يتجاوز 0.05.

الجدول 10.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Contribution %	F-value	p-value
Model	2431.50	9	270.17		14.18	0.0010
A-Vc	27.38	1	27.38	1.13%	1.44	0.2696
B-ap	1270.08	1	1270.08	52.26%	66.67	<0.0001
C-f	877.805	1	877.81	36.10%	46.08	0.0003
AB	81	1	81	3.33%	4.25	0.0781
AC	5.76	1	5.76	0.24%	0.3024	0.5995
BC	116.64	1	116.64	4.80%	6.12	0.0426
A ²	4.09	1	4.09	0.17%	0.2144	0.6574
B ²	46.83	1	46.83	1.93%	2.46	0.1609
C ²	0.0052	1	0.0052	0.0002%	0.0003	0.9873
Residual	133.35	7	19.05			
Lack of Fit	118.94	3	39.65		11.01	0.0211
Pure Error	14.41	4	3.60			
Cor Total	2564.86	16		100%		

* تحليل الانحدار *Analyse de Régression*:

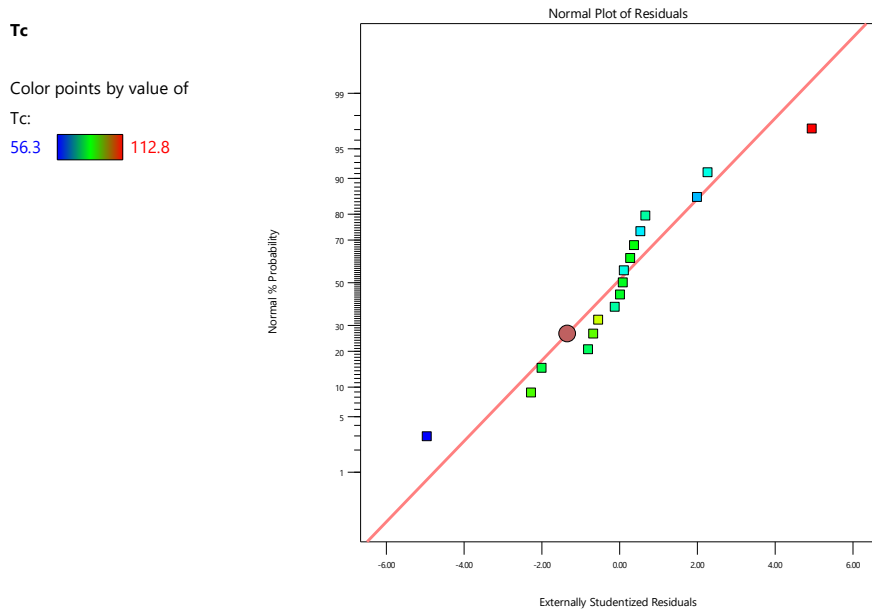
النموذج الرياضي للاستجابة (Tc) يعبر عنه بالمعادلة (4.4).

$$T = 33,30715 + 0,17004Vc + 100,16ap - 21,4f - 0,36Vc ap + 0,24Vc f + 216ap f \dots\dots\dots(4.4) - 0,000394Vc^2 - 53,36ap^2 - 3,5f^2$$

الجدول 11.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

Std. Dev.	4.36	R ²	0.9480
Mean	80.47	Adjusted R ²	0.8812
C.V. %	5.42	Predicted R ²	0.2492
		Adeq Precision	13.7862

كما هو موضح في الجدول 11.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لحرارة القطع (Tc) معامل تحديد عالي قدره 94.80%. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي.



الشكل 6.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

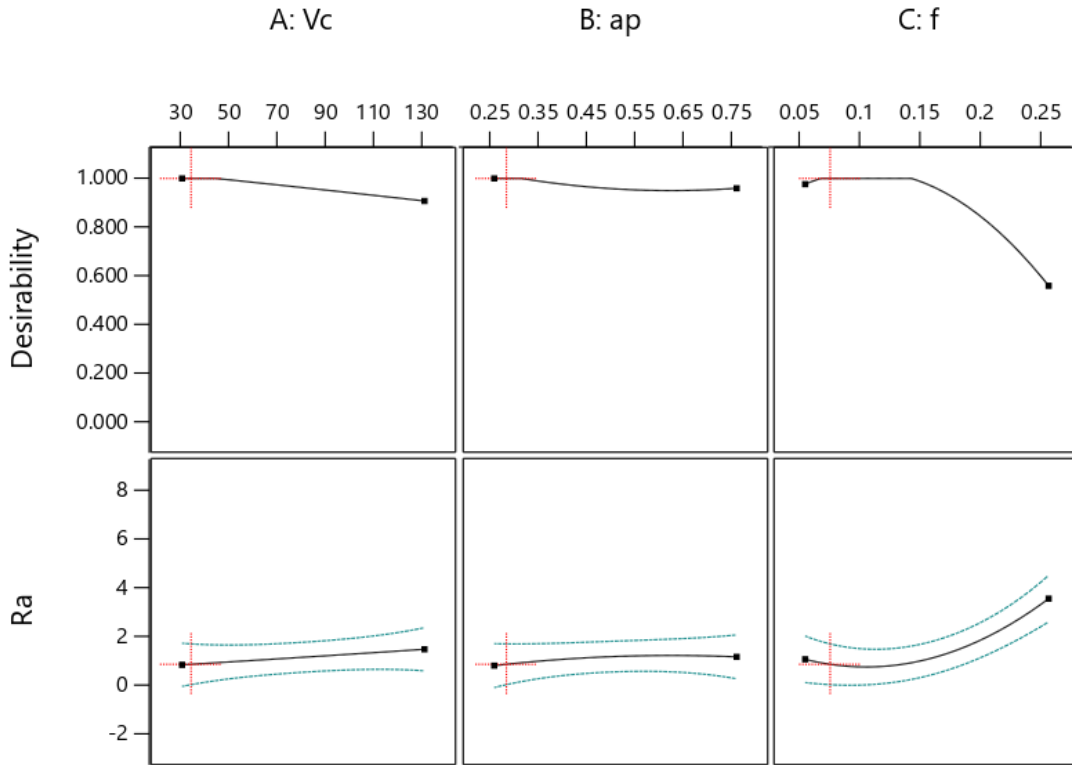
يمثل الشكل 6.4 مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، نلاحظ أن القيم التجريبية الممثلة بنقاط في المخطط قريبة من الخط المستقيم الممثل باللون الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج.

3.4.4 تحسين الاستجابة Response Optimization:

من أجل تحديد شروط القطع المثلى التي تؤدي إلى تقليل كل من خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة التشغيل، يتم استخدام أداة تحسين الاستجابة (Response Optimization) في برنامج Design-expert. تعتمد عملية التحسين على تحديد القيم المثالية للمتغيرات المستقلة، وهي: سرعة القطع (Vc)، التغذية (f)، وعمق القطع (ap)، والتي تساهم في الحصول على أقل قيمة ممكنة لكل من الخشونة (Ra) ودرجة الحرارة (Tc).

* تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra):

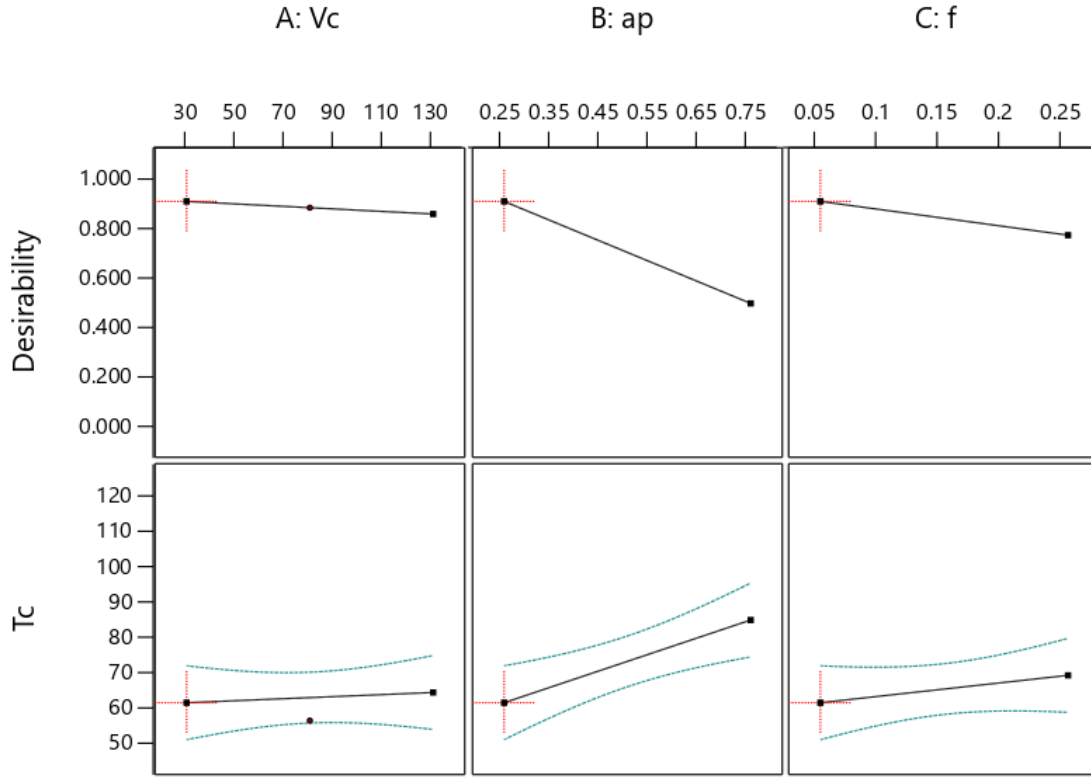
تشير البيانات الممثلة في الشكل 7.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة للخشونة السطحية (Ra) هي: سرعة قطع تبلغ $V_c = 33,69 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $a_p = 0,275 \text{ mm}$ ، وتغذية تساوي $f = 0,07 \text{ mm/tr}$. حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف سلوك الخشونة السطحية. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ Ra فقد بلغت $0,8369 \mu\text{m}$.



الشكل 7.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra).

* تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc):

تشير البيانات الممثلة في الشكل 8.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة لدرجة الحرارة (Tc) هي: سرعة قطع تبلغ $V_c = 30,0132 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $a_p = 0,25 \text{ mm}$ ، و تغذية تساوي $f = 0,05 \text{ mm/tr}$. حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف سلوك الخشونة السطحية. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ Tc فقد بلغت $61,346 \text{ }^\circ\text{C}$.



الشكل 8.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc).

5.4. تطبيق منهجية تصميم المركب المركزي (CCD):

تعد طريقة تصميم المركب المركزي (CCD) ضمن منهجية سطح الاستجابة (RSM) أداة فعالة لتحسين العمليات التجريبية، حيث تساهم في تقليل عدد التجارب المطلوبة بشكل كبير مع الحفاظ على دقة النتائج، بالإضافة أنها تعطي فكرة عن تأثير التفاعلات بين العوامل في التأثير على الاستجابات. في هذه الدراسة تم توظيف طريقة (CCD) بهدف مقارنتها مع كل من طريقة Taguchi وطريقة Box Behnken في تحديد أفضل مجموعة من معايير القطع. تم بالاعتماد على منهجية (CCD) تصميم 20 تجربة والتي سيتم إنجازها سعياً لتحقيق الأهداف المنشودة.

التجارب تم تنفيذها وفق تصميم منهجية CCD موضحة في الجدول 12.4 مع النتائج المتحصل عليها لكل من خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة القطع (Tc).

الجدول 12.4: تصميم التجارب وفق CCD ونتائج كل من Ra و Tc.

N°	Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (μm)	Tc (C°)
1	30	0,25	0,05	0.442	47.2
2	130	0,25	0,05	1.329	46.2
3	30	0,75	0,05	0.933	81.6
4	130	0,75	0,05	1.15	108.3
5	30	0,25	0,25	3.309	60.1
6	130	0,25	0,25	3.625	59.8
7	30	0,75	0,25	4.765	61.3
8	130	0,75	0,25	5.64	105.3
9	30	0,50	0,15	1.963	52.7
10	130	0,50	0,15	1.924	69.5
11	80	0,1725	0,15	1.198	55.1
12	80	0,8275	0,15	2.149	104.1
13	80	0,50	0,019	1.393	74.6
14	80	0,50	0,281	3.791	58.5
15	80	0,50	0,15	3.433	86.2
16	80	0,50	0,15	2.065	82.9
17	80	0.5	0.15	2.279	84.1
18	80	0.5	0.15	2.277	79.3
19	80	0.5	0.15	2.135	83.7
20	80	0.5	0.15	2.26	82.6

1.5.4. تحليل النتائج الخاصة بالخشونة (Ra):

* تحليل التباين ANOVA:

يمثل الجدول 13.4 نتائج تحليل التباين لتأثير شروط القطع على معيار الخشونة (Ra)، حيث يتضح أن أكثر العوامل تأثيراً على (Ra) هي التغذية f بنسبة مساهمة كبيرة جدا تبلغ 82.54%. يأتي بعدها عمق القطع ap الذي يساهم بنسبة ضئيلة جدا تبلغ 7.33%، كما أن p-value الخاص بهما أقل من 0.05. في حين أن سرعة القطع Vc والتفاعلات بين العوامل لا يمكنهم المساهمة في مقاييس الأداء لأن قيمة p-value الخاص بهم يتجاوز 0.05.

الجدول 13.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Ra).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Contribution %	F-value	p-value
Model	30.58	9	3.40		12.56	0.0002
A-Vc	0.5090	1	0.5090	1,66%	1.88	0.2002
B-ap	2.24	1	2.24	7,33%	8.28	0.0164
C-f	25.23	1	25.23	82,54%	93.25	< 0.0001
AB	0.0015	1	0.0015	0,005%	0.0057	0.9413
AC	0.0009	1	0.0009	0,003%	0.0035	0.9540
BC	1.25	1	1.25	4,09%	4.61	0.0573
A ²	0.0002	1	0.0002	0,0007%	0.0006	0.9807
B ²	0.2122	1	0.2122	0,69%	0.7843	0.3966
C ²	1.13	1	1.13	3,70%	4.17	0.0683
Residual	2.71	10	0.2705			
Lack of Fit	1.41	5	0.2814		1.08	0.4661
Pure Error	1.30	5	0.2597			
Cor Total	33.29	19		100%		

*** تحليل الانحدار Analyse de Régression :**

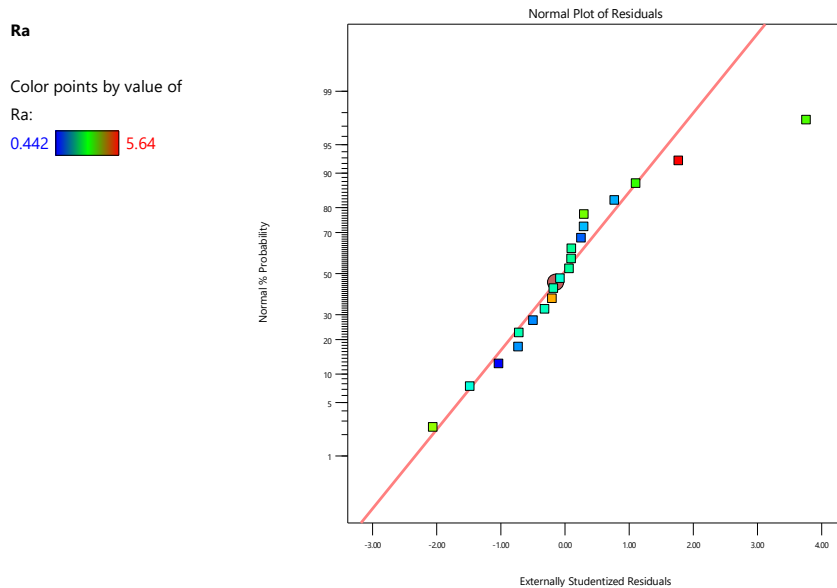
النموذج الرياضي للاستجابة (Ra) يعطى بالمعادلة (5.4).

$$Ra = 0,012171 + 0,005238Vc + 4,05751ap - 11,41032f - 0,001110Vc ap + 0,002175Vc f + 15,795ap f \dots\dots\dots(5.4) - 3,10909Vc^2 - 4,44436ap^2 + 64,07273f^2$$

الجدول 14.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

Std. Dev.	0.5201	R²	0.9187
Mean	2.40	Adjusted R²	0.8456
C.V. %	21.64	Predicted R²	0.6074
		Adeq Precision	12.4383

كما هو موضح في الجدول 14.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لمتوسط الخشونة (Ra) معامل تحديد عالي قدره 91.87%. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي.



الشكل 9.4: مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

يمثل الشكل 9.4 مخطط توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، نلاحظ أن القيم التجريبية قريبة من القيم النظرية الممثلة بالخط المستقيم الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج.

2.5.4. تحليل النتائج الخاصة بدرجة الحرارة (Tc):

* تحليل التباين ANOVA:

يظهر الجدول 15.4 نتائج تحليل التباين لدرجة حرارة القطع (Tc)، حيث يتضح أن العامل الأكثر تأثيراً على (Tc) هو عمق القطع ap، الذي ساهم بنسبة 60.34%، تليه سرعة القطع Vc بنسبة 12.14%، ثم التفاعل بين العوامل ap و Vc بنسبة تأثير 10.59%، وأخيراً التفاعل Vc^2 بنسبة تبلغ 5.47% إذ أن هذا العامل له تأثير صغير على قيم Tc مقارنة بالعوامل السابقة، كما أن p-value الخاص بهم أقل من 0.05. في حين أن التغذية f والتفاعلات بين العوامل لا يمكنهم المساهمة في مقاييس الأداء لأن قيمة p-value الخاص بهم يتجاوز 0.05 وهذا مأكده قيم المساهمة الضئيلة لهذه العوامل.

الجدول 15.4: تحليل التباين لتأثير شروط القطع على (Tc).

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Contribution %	F-value	p-value
Model	6121.37	9	680.15		10.57	0.0005
A-Vc	743.044	1	743.04	12,14%	11.55	0.0068
B-ap	3694.08	1	3694.08	60,34%	57.43	< 0.0001
C-f	16.64	1	16.64	0,27%	0.2587	0.6221
AB	648	1	648	10,59%	10.07	0.0099
AC	40.5	1	40.5	0,66%	0.6296	0.4459
BC	310.005	1	310.005	5,06%	4.82	0.0529
A ²	334.95	1	334.95	5,47%	5.21	0.0456
B ²	153.19	1	153.19	2,50%	2.38	0.1538
C ²	85.82	1	85.82	1,40%	1.33	0.2749
Residual	643.28	10	64.33			
Lack of Fit	617.59	5	123.52		24.04	0.0017
Pure Error	25.69	5	5.14			
Cor Total	6764.65	19		100%		

*** تحليل الانحدار :Analyse de Régression**

النموذج الرياضي للاستجابة (Tc) يعبر عنه بالمعادلة (6.4).

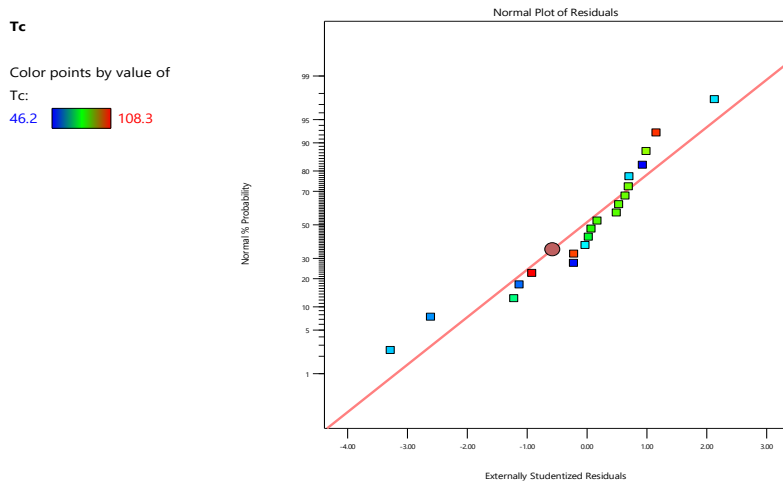
$$Tc = 32,99468 + 0,451227Vc - 62,78818ap + 243,19091f + 0,72Vc ap + 0,45Vc f - 249ap f - 0,004415Vc^2 + \dots\dots\dots(6.4)$$

$$119,41818ap^2 - 558,63636f^2$$

الجدول 16.4: نسبة توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

Std. Dev.	8.02	R²	0.9049
Mean	74.16	Adjusted R²	0.8193
C.V. %	10.82	Predicted R²	0.4186
		Adeq Precision	12.1471

كما هو موضح في الجدول 16.4، حقق نموذج الانحدار الخطي لحرارة القطع (Tc) معامل تحديد عالي قدره 90.49%. أي يوجد توافق نوعي بين البيانات المرصودة والقيم المتنبأ بها من قبل النموذج الإحصائي.



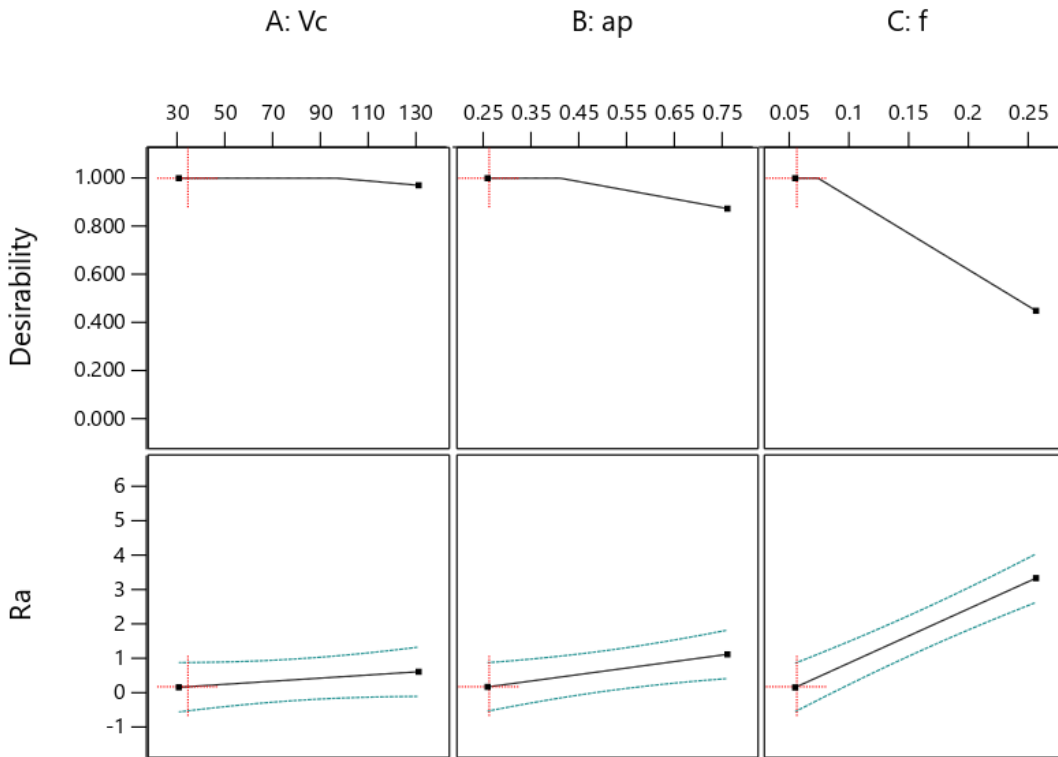
الشكل 10.4: مخطط مدى توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي.

يمثل الشكل 10.4 مخطط مدى توافق البيانات المرصودة مع القيم التي يتنبأ بها النموذج الإحصائي، نلاحظ أن النقاط قريبة من الخط المستقيم الممثل باللون الأحمر، والذي يمثل الرسم البياني للنموذج الرياضي. يشير هذا القرب إلى مدى توافق البيانات مع النموذج.

3.5.4. تحسين الاستجابة Response Optimization:

* تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra):

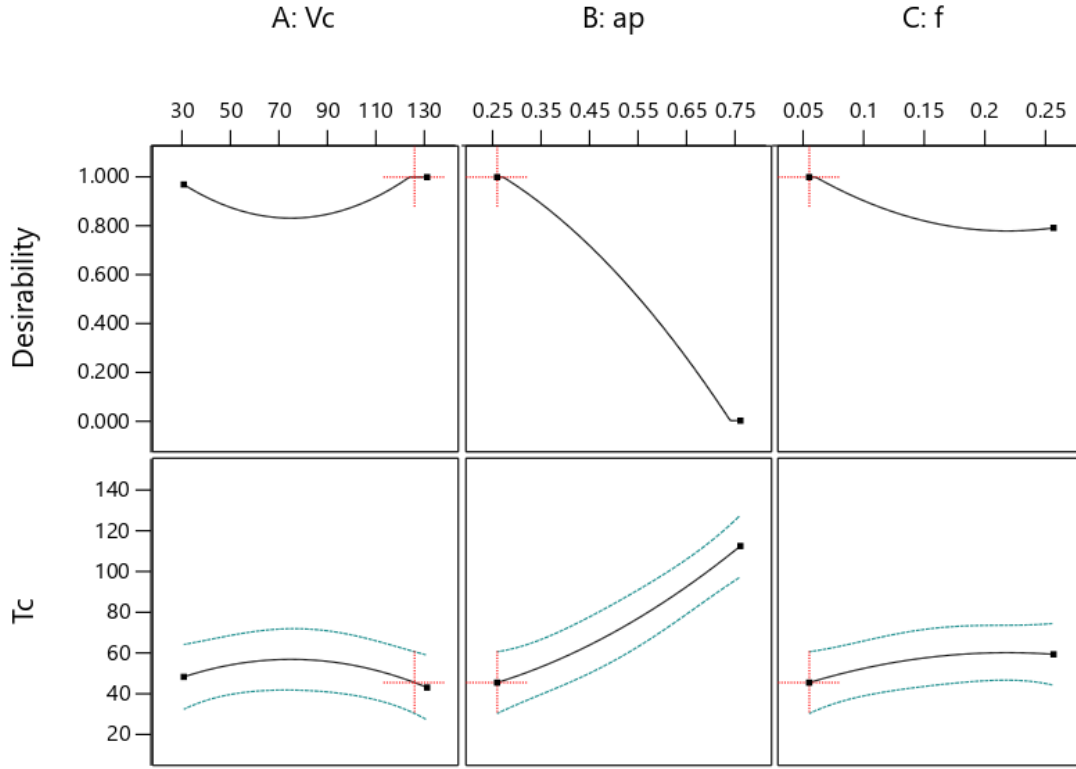
تشير البيانات الممثلة في الشكل 11.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة للخشونة السطحية (Ra) هي: سرعة قطع تبلغ $V_c = 33,806 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $a_p = 0,2533 \text{ mm}$ ، وتغذية تساوي $f = 0,05137 \text{ mm/tr}$. حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف سلوك الخشونة السطحية. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ (Ra) فقد بلغت $0,161 \mu\text{m}$.



الشكل 11.4: مخطط تحسين الاستجابة لخشونة السطح (Ra).

* تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc):

تشير البيانات الممثلة في الشكل 12.4 إلى أن القيم المثلى لعوامل القطع للحصول على أقل قيمة ممكنة لدرجة الحرارة (Tc) هي: سرعة قطع تبلغ $V_c = 124,855 \text{ m/min}$ ، عمق قطع قدره $a_p = 0,2503 \text{ mm}$ ، وتغذية تساوي $f = 0,05 \text{ mm/tr}$. حيث بلغت نسبة الاستحسان 100%، مما يعكس دقة وكفاءة النماذج التحليلية المستخدمة في وصف سلوك الخشونة السطحية. أما القيمة المتوقعة الدنيا لـ (Tc) فقد بلغت $45,2694 \text{ }^\circ\text{C}$.



الشكل 12.4: مخطط تحسين الاستجابة لدرجة الحرارة (Tc).

6.4. مقارنة بين تصميم Taguchi، تصميم Box Behnken وتصميم المركب المركزي (CCD):

أظهرت المقارنة بين طرق التصميم الثلاث (Taguchi، Box-Behnken، و CCD) تفاوتاً من حيث عدد التجارب، دقة النماذج الإحصائية، نسبة مساهمة العوامل في الاستجابات المدروسة، وكفاءة تحسين الاستجابة، حيث كانت النتائج كالتالي:

- من أجل ثلاث عوامل متغيرة لثلاث مستويات استخدمت طريقة Taguchi 9 تجارب فقط عبر مصفوفة L9، ما يجعلها الأكثر اقتصاداً، مقابل 17 تجربة في Box-Behnken و 20 تجربة في CCD.
- في تحليل التباين (ANOVA) لخشونة السطح (Ra) وفق طريقة Taguchi، كانت التغذية (f) العامل الأكثر تأثيراً بنسبة 71.19%، يليها عمق القطع (ap) بنسبة 23.53%. أما في طريقة Box-Behnken، فقد كانت مساهمة f أيضاً الأعلى بنسبة 62.97%، تليها f² بنسبة 16.11%، و ap بنسبة 12.84%، و Vc بنسبة 3.84%. كما أظهر التفاعل بين العوامل ap و f مساهمة إضافية ضئيلة بنسبة 3.76%. في طريقة CCD كذلك أخذت f الصدارة بنسبة عالية جداً 82.54%، يليها ap بنسبة 7.33%.

فيما يتعلق بدرجة حرارة القطع (Tc)، أظهرت طريقة Taguchi أن عمق القطع (ap) كان العامل الأهم بنسبة 52.32%، تليه سرعة القطع (Vc) بنسبة 43.79%، ثم التغذية (f) بنسبة محدودة قدرها 3.83%. في Box-Behnken، كانت مساهمة ap أيضًا الأعلى بنسبة 52.26%، تليها f بنسبة 36.10%، مع تفاعل ضئيل بين ap و f بنسبة 4.80%. أما في CCD، فقد حافظت ap على صدارة التأثير بنسبة 60.34%، تليها Vc بنسبة 12.14%، ثم تفاعل ap و Vc بنسبة 10.59%، وأخيرا التفاعل Vc^2 بنسبة ضئيلة تبلغ 5.47%.

- من حيث دقة النماذج الإحصائية (معامل التحديد R^2)، فقد سجلت Taguchi قيمة R^2 بلغت 91.81% لخشونة السطح و 98.74% لدرجة الحرارة وهو الأعلى دقة لنموذج Tc، ما يعكس توافقاً قوياً بين النماذج والبيانات التجريبية. في المقابل، حققت Box-Behnken أعلى دقة لنموذج Ra بـ $R^2 = 97.51\%$ ، وبلغ R^2 لنموذج Tc حوالي 94.80%. أما CCD فقد قدم أداءً مقبولاً بـ $R^2 = 91.87\%$ لـ Ra و 90.49% لـ Tc، لكنها كانت الأقل دقة نسبياً بين الطرق الثلاث.

- من حيث تحسين الاستجابة، تبين أن أفضل أداء لتحسين الاستجابة كان من نصيب تصميم CCD (المركب المركزي)، حيث تم تسجيل أدنى قيمة لخشونة السطح $Ra = 0.161 \mu m$ و درجة حرارة $Tc = 45.2694^\circ C$ ، ما يدل على قدرة هذا التصميم على تمثيل التفاعلات والانحناءات بدقة عالية من خلال النموذج التربيعي الكامل. أما طريقة تاغوشي (Taguchi)، فاحتلت المرتبة الثانية، حيث سجلت قيمة $Ra = 0.2205 \mu m$ و $Tc = 42.2111^\circ C$ ، وهي نتائج جيدة نسبياً تم الحصول عليها باستخدام مصفوفة L9 رغم غياب التمثيل الدقيق للتفاعلات، مما يجعلها مناسبة لتجارب أولية بأقل عدد من التجارب. في المقابل، سجلت طريقة Box-Behnken الأداء الأضعف في تحسين الاستجابتين، حيث بلغت $Ra = 0.8369 \mu m$ و $Tc = 61.346^\circ C$ ، مما يعكس محدودية هذا التصميم في التعامل مع شروط القطع المعقدة في هذه الحالة. وبالتالي، فإن CCD هو الأنسب لتحقيق استجابات مثلى بدقة عالية، يليه Taguchi كخيار بسيط وفعال في بعض الحالات، فيما جاء Box-Behnken بأداء دون المتوقع في هذا التطبيق المحدد.

7.4 . خاتمة:

تناولت هذه الدراسة مقارنة بين طرق تصميم التجارب في تحليل تأثير شروط القطع (سرعة القطع، التغذية، وعمق القطع) على خشونة السطح ودرجة حرارة القطع. منهجيات تصميم التجارب التي تم المقارنة بينها هي: Taguchi، Box Behnken، و CCD.

من خلال تحليل النتائج التجريبية المستخلصة من منهجيات التصميم الثلاث، تبين أن لكل منها مزايا محددة تتعلق بعدد التجارب، دقة النماذج، ومدى شمولية تحليل التفاعلات بين العوامل. أظهرت طريقة Taguchi كفاءة في تقليل عدد التجارب مع دقة جيدة، بينما وفرت Box-Behnken توازناً ممتازاً بين عدد التجارب ودقة النماذج، في حين قدمت CCD تحليلاً شاملاً للتفاعلات والانحناءات مع أفضل أداء في تحسين الاستجابات. وقد تم التوصل إلى أن التغذية تُعد العامل الأكثر تأثيراً على خشونة السطح، في حين أن عمق القطع له التأثير الأكبر على درجة حرارة القطع. كما أسهم استخدام أدوات التحسين في تحديد الشروط المثلى التي تحقق جودة سطح عالية وتقليل للحرارة أثناء التشغيل.

خاتمة عامة

خاتمة عامة:

تُعد هذه الدراسة مساهمة علمية في ميدان التصنيع الميكانيكي، من خلال السعي إلى تحسين جودة عمليات التشغيل بالقطع عبر تطبيق منهجيات فعالة لتصميم التجارب، تهدف إلى تحديد الظروف المثلى للتشغيل وتحسين الأداء الصناعي. تمحورت الدراسة حول مقارنة ثلاث منهجيات رئيسية لتصميم التجارب، وهي: طريقة تاغوشي (Taguchi)، تصميم Box-Behnken، ومنهجية سطح الاستجابة باستخدام التصميم المركب المركزي (RSM – Central Composite Design)، وذلك في إطار دراسة تأثير شروط القطع (سرعة القطع، عمق القطع، والتغذية) على مؤشرين حيويين في الخراطة الطولية لمادة الألمنيوم، هما خشونة السطح (Ra) ودرجة حرارة القطع (Tc).

فيما يخص خشونة السطح، أظهرت طريقة تاغوشي أن التغذية تمثل العامل الأكثر تأثيراً، مع مساهمة أقل لعمق القطع، غير أن هذه الطريقة لم تتمكن من تمثيل التفاعلات بين العوامل بسبب طبيعة تصميمها الثابت. من جانب آخر، مكّن تصميم بوكس-بنكن من دراسة التأثيرات الفردية لسرعة القطع والتغذية وعمق القطع، بالإضافة إلى بعض التفاعلات، مما منحه قدرة جزئية على تحليل العلاقات المتبادلة. أما التصميم المركب المركزي (CCD) فقد تميّز بقدرته على تمثيل الانحناءات والتفاعلات المعقدة بشكل فعال، ما سمح ببناء نموذج دقيق لسلوك الخشونة السطحية.

أما فيما يتعلق بدرجة حرارة القطع، فقد أظهرت طريقة تاغوشي أن عمق القطع هو العامل الأكثر تأثيراً، متبوعاً بسرعة القطع، في حين كان تأثير سرعة التغذية ضعيفاً نسبياً. وعلى الرغم من دقة نموذجها الإحصائي، إلا أن محدوديتها في تحليل التفاعلات ظلت قائمة. أما تصميم بوكس-بنكن، فقد قدم تحليلاً أكثر توازناً، حيث تم تسجيل تأثيرات معتبرة لعمق القطع والتغذية، إلى جانب بعض التفاعلات المحدودة. من جهته، أظهر التصميم المركب المركزي (CCD) قدرة أكبر على تمثيل التفاعلات المعقدة، لا سيما بين عمق القطع وسرعة القطع، ما مكّنه من تقديم نموذج حراري أكثر دقة وموثوقية.

من حيث كفاءة النمذجة، حققت Taguchi أعلى توافق إحصائي بين القيم المتوقعة والفعلية لدرجة الحرارة، في حين كانت Box-Behnken الأكثر دقة في نمذجة خشونة السطح. بينما قدم CCD دقة متوازنة ومقبولة في كلا الحالتين. أما على مستوى تحسين الاستجابات، فقد أظهر CCD قدرة واضحة على تحديد الشروط المثلى التي تحقق أقل مستوى ممكن لكل من الخشونة ودرجة الحرارة، مما يجعله الأداة المثلى في التطبيقات التي تتطلب أداءً عالي الدقة. من جانبها، قدمت Taguchi حلولاً محسّنة ضمن حدود تصميمها، وهي مناسبة للمرحلة الأولية من الدراسات أو في البيئات الصناعية محدودة الإمكانيات. أما Box-Behnken، فرغم قدرته على

توصيف التأثيرات الأساسية، إلا أن تحسينه كان محدودًا نسبيًا، مما يقلل من ملاءمته في الحالات التي تتطلب دقة عالية في التحكم بظروف التشغيل.

انطلاقًا من هذه المعطيات، يُوصى مستقبلاً باعتماد طريقة Taguchi عند الحاجة إلى تقليل عدد التجارب دون التطرق إلى التفاعلات، واعتماد CCD حين تكون معرفة التفاعلات والتغيرات غير الخطية ضرورية، خاصة في بيئات التصنيع ذات المتطلبات الصارمة. كما يُنصح بتوسيع نطاق هذه الدراسة لتشمل مواد أخرى بخواص ميكانيكية وحرارية مختلفة، وتجريب أدوات قطع بأشكال ومواد متنوعة. ويُقترح أيضًا دراسة تأثير عوامل أخرى مثل التبريد، الاهتزاز، والتشحيم، لما لها من دور كبير في استقرار وجودة عملية القطع.

المراجع

- [1] م.م. سارة علي عبد الحسين، « ورشة الخراطة Engineering workshops»، منهاج التدريب العلمي [1] لمادة الورش الهندسية، 2021-2022.
- [2] «Préparation de Production en Productique Mécanique – Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU)»، 23 février 2015. [متصل]. Available: https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/chapitre_2_4_1_1.html [تاريخ الوصول 25December 2024.]
- [3] عبد المسيح جرجس منقريوس سعيد بيومي، « تكنولوجيا الخراطة تخصص تشغيل المعادن ». [4] يونس الفسفوس، عبد الله عبد الحفيظ، جلال السلايمة، نزيه الدراويش، « الخراطة والتسوية الآلية الطبعة الأولى »، رام الله: م. عصام دوييمات "مركز المناهج"، 2006.
- [5] C. Barlier, L. Girardin, « MémoTech : Productique, Matériaux et usinage », 3ème Edition ،Paris: Castella 1992 .
- [6] المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، «أساسيات تشغيل المعادن»، المملكة العربية السعودية، 2008.
- [7] Azizi Mohamed Walid ،«Cours fabrication mécanique» Institut des sciences et de la technologie Département des Sciences et Technologie Mila 2019/2018 .
- [8] Gara Souhir ،« Cours interactif: Le tournage »، institut Superieur des etudes technologiques de nabeul .2016/2015
- [9] المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، «أنواع المخارط وأجزائها»، المملكة العربية السعودية، 2007.
- [10] المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج، «عمليات الخراطة»، المملكة العربية السعودية، 2007.

- [11] Fnides Mohamed ,«Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface et des vibrations lors de fraisage de face », thèse de doctorat , Université 8 Mai 1945 Guelma .2017
- [12] المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني، القياسات - تخصص الإنتاج - الوحدة الرابعة: قياس خشونة الأسطح، المملكة العربية السعودية.
- [13] Maurice Pillet ,«Les plans d'expériences par la méthode Taguchi».2011 ،
- [14] k.Krishnaiah and P.Shahabudeen ,«Applied Design Of Experiments and Taguchi Methods » ،New Delhi: PHI Learning Private Limited .2012 .
- [15] م.ع.حكومه م.م.بن عيسى ه.ع.السويحلي غ.إ.إبراهيم ب.ص.يونس، « دراسة عوامل القطع المثلى لخشونة السطح في عملية الخراطة الطولية لعينة من سبيكة الألومنيوم باستخدام طريقة تاغوتشي»، مجلة الجامعة الأسمرية: العلوم الأساسية و التطبيقية، المجلد 6 العدد 5، رقم عدد خاص بالمؤتمر الرابع للعلوم الهندسية والتقنية (CEST-2021)، ديسمبر 2021.
- [16] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook ,« Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments », Fourth Edition ,Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc .2016 .
- [17] Lakhdar Laouar ,«Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 – Optimisation et caractérisation», thèse de DOCTORAT D'ETAT ",Université Badji Mokhtar – Annaba .2007 .
- [18] Ross, Phillip J ,«Taguchi techniques for quality engineering : loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design »,New York: McGraw-Hill book company .1988.
- [19] L.Bouzid, M.A.Yallese, K.Chaoui, T.Mabrouki, L.Boulanouar,

«Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology» ,Journal of Engineering Manufacture ,Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B ,April 2014 .

[20] Dr. Mohamed Ahmed Zaid ,« Correlation and Regression Analysis» ,Ankara, Turkey: SESRIC .2015

[21] Enrique DEL Castillo, Douglas C.Montgomery, Daniel R.Mccarville
« Modified Desirability Functions for Multiple Response Optimization» Journal of Quality Technology, Vol. 28, No.3 ,pp. 337–346 ,July 1996 .

[22] Caglar S. Aksezer, Ph.D ,«On the Sensitivity of Desirability Functions for Multiresponse Optimization» ,Istanbul, Turkey: Isik University .