

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

د.م. سليمان يوسف*

ملخص البحث:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير بارامترات القطع الأساسية (سرعة القطع، معدل شالتغذية، وحالة التبريد) على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات فولاذ AISI 1025 أثناء الخراطة التقليدية. أجريت التجارب باستخدام سرعات قطع مختلفة (منخفضة، متوسطة، عالية) وثلاثة مستويات للتغذية، في حالتها التشغيل الجاف ومع التبريد.

بينت النتائج أن جميع البارامترات أثرت بشكل أو بآخر على القساوة السطحية، حيث أدت زيادة سرعة القطع أو معدل التغذية إلى ارتفاع القساوة نتيجة التشوه اللدن والحرارة المتولدة في منطقة القطع، بينما أدى استخدام التبريد إلى تقليل القساوة عبر تقليل الاحتكاك وخفض درجة الحرارة. بين تحليل التباين (ANOVA) أن سرعة القطع هي العامل الأكثر تأثيراً، تليها التغذية، ثم التبريد. وخلصت الدراسة إلى أن القيم المثلى للحصول على توازن بين قساوة سطحية معتدلة وعمر أداة أطول تتمثل في اختيار سرعات قطع متوسطة مع معدل تغذية منخفض واستخدام التبريد المستمر.

الكلمات المفتاحية:

الخراطة، قساوة السطح، سرعة القطع، معدل التغذية، عمق القطع، سائل التبريد

*: عضو هيئة فنية في قسم هندسة التصميم والإنتاج- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

Abstract:

This study aims to evaluate the effect of cutting parameters (cutting speed, feed rate, and cooling condition) on the surface hardness of AISI 1025 steel workpieces during conventional turning.

Experiments were conducted at three cutting speeds (low, medium, and high) and three feed rates, under both dry and wet machining conditions.

The results showed that all parameters influenced the surface hardness to varying degrees. Increasing cutting speed and feed rate led to higher hardness values due to greater plastic deformation and heat generation, while the use of coolant reduced hardness by dissipating heat and minimizing friction. Analysis of variance (ANOVA) indicated that cutting speed was the most influential factor, followed by feed rate and coolant. The study concludes that optimal machining conditions for balanced surface hardness and tool life are achieved at medium cutting speeds, low feed rates, and continuous coolant application.

Keywords: Turning, Surface Hardness, Cutting Speed, Feed Rate, Depth of Cut, Coolant

1- المقدمة:

تُعد عملية الخراطة من أبرز عمليات التشغيل المستخدمة للحصول على أبعاد دقيقة وتشطيب سطحي جيد، وتعتبر القساوة السطحية من الخصائص الميكانيكية الأساسية التي تحدد أداء الأجزاء في الخدمة، إذ ترتبط بشكل مباشر بمقاومة التآكل، مقاومة التعب، والعمر التشغيلي للأجزاء. وتلعب الظروف التشغيلية أثناء الخراطة دورًا بارزًا في تغيير القساوة السطحية، سواء عبر التشوه الميكانيكي الناتج عن قوى القطع، أو عبر التأثير الحراري الناجم عن الاحتكاك وارتفاع درجات الحرارة في منطقة القطع [1][2].

تشير التقارير الحديثة إلى أن عمليات الخراطة التقليدية لا تزال تُستخدم في أكثر من 55% من عمليات التشغيل في المصانع الصغيرة والمتوسطة، نظرًا لتكلفتها المنخفضة ومرونتها في التصنيع [4][6]. تؤثر بارامترات القطع تأثيرًا جوهريًا على خواص الطبقة السطحية الناتجة، بما في ذلك القساوة السطحية، التي تؤثر بدورها على مقاومة التآكل والتعب [3][4].

يُصنّف الفولاذ AISI 1025 كفولاذ منخفض الكربون يحتوي على نحو 0.25% كربون، ويتميز بقابلية جيدة للتشغيل، إضافة إلى متانة ومرونة مناسبة تجعله مادة مفضلة في الصناعات الميكانيكية. إلا أن خواصه السطحية يمكن أن تتغير بفعل عمليات القطع، مما يحتم دراسة العلاقة بين بارامترات الخراطة والقساوة السطحية [3][10].

بناءً على ذلك، يهدف هذا البحث إلى تحديد أثر كل من سرعة القطع، معدل التغذية، وحالة التبريد على القساوة السطحية للفولاذ AISI 1025، باستخدام منهجية تجريبية مدعومة بتحليل التباين (ANOVA) [7][4][3].

تشير بعض الدراسات إلى أن ظروف القطع وهندسة قلم القطع ومعدن المشغولة تؤثر في القساوة السطحية. أظهر (Zurita–Hurtado et al. (2017 أن زيادة سرعة القطع في خراطة الفولاذ منخفض الكربون تؤدي إلى ارتفاع القساوة السطحية نتيجة الحرارة المتولدة [10]. كما أن خصائص السطح الناتجة عن عمليات الخراطة تتأثر بشكل مباشر بكل من سرعة القطع ومعدل التغذية وزاوية الأداة [4][6].

وجد الباحثون أن القطع الجاف للفولاذ AISI 4340 أدى إلى خشونة سطحية $0.85 \mu\text{m Ra}$ مقابل $0.42 \mu\text{m}$ في حالة التبريد باستخدام MQL ، كما زادت القساوة السطحية من HV 258 إلى HV 278 عند السرعات الأعلى (200–250 م/دقيقة) [8][9]. كذلك، أظهر Ebrahimi et al. (2021) أن التغذية العالية (>0.2 مم/دورة) سببت انخفاض القساوة بنسبة 10% بسبب زيادة حرارة التشوه [5].

كما أوضحت أبحاث أخرى أن التبريد يقلل من القساوة السطحية نتيجة خفض درجات الحرارة وتقليل التشوه الحراري [7][5]. وتشير الدراسات إلى أن اختيار ظروف تشغيل مناسبة يساهم في ضبط خواص السطح وتحسين عمر الأداة [11][12].

يمكن استخلاص النقاط التالية من الدراسات السابقة:

- التأثير الأكبر على القساوة يأتي من سرعة القطع، تليها معدل التغذية.
- استخدام تبريد MQL أو الزيوت الحيوية يعطي نتائج أفضل من القطع الجاف بمعدل HV 10–20 زيادة.

تأتي هذه الدراسة استكمالاً لهذه الأبحاث، حيث تم تطبيق منهج تجريبي مباشر على عينات من فولاذ AISI 1025 باستخدام مخرطة تقليدية، وقياس القساوة، مع تحليل العلاقة بين متغيرات القطع (السرعة، التغذية، التبريد) على قساوة السطح.

أهمية البحث:

- تكمن أهمية البحث في تحديد العلاقة بين متغيرات القطع وتغير القساوة السطحية.

- يساعد في اختيار بارامترات تشغيل مثلى للمحافظة على خواص السطح المشغل خلال عملية التشغيل.
- 2- هدف البحث:

- ✓ يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير متغيرات القطع الأساسية وهي سرعة القطع، ومعدل التغذية، وحالة التشغيل على المساواة السطحية لفولاذ AISI 1025 باستخدام تصميم التجارب من نوع Taguchi L9 لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً وتقييم ثبات العملية.
 - ✓ وضع توصيات عملية لظروف تشغيل مثلى تحقق تحسين الخواص السطحية.
- 3- مواد وطرائق البحث:

تحضير العينة والتجهيز للعمل:

تم فحص عينات البحث بعد شحذها بورق الشد وتعيمها بشكل جيد للتأكد من نسبة العناصر السبائكية الموجودة بجهاز التحليل الطيفي للمعادن، كانت نتائج فحص البنية موضحة بالجدول (1):

جدول (1) التركيب الكيميائي لمعدن المشغولة

اسم العنصر	C	S	P	Si	Mn	Fe
النسبة %	0.24	0.01	0.001	0.2	0.78	98.74

نلاحظ من خلال نتائج التحليل أن الفولاذ المستخدم هو فولاد منخفض نسبة الكربون AISI 1025 ويفضل استخدام أداة قطع من نوع HSS صلب السرعات العالية.

شحذ وتحضير قلم القطع:

تم اختيار الزوايا استناداً إلى توصيات دليل Machining Data Handbook لضمان أفضل أداء في خراطة الفولاذ منخفض الكربون. وفيما يلي جدول (2) يبين قيم بعض زوايا قلم قطع مصنوع من صلب السرعات العالية (HSS).

جدول (2) قيم زوايا قلم القطع المستخدم للخراطة

اسم الزاوية	مقدارها
زاوية الخلوص الرئيسية α	12°
زاوية الجرف الرئيسية γ	8°
زاوية القطع δ	70°

تم استخدام جهاز محمول لقياس القساوة (Metal Hardness Tester) حيث تم اعتماد قساوة فيكرز علماً أن الجهاز يعطي أكثر من نوع، والجهاز نوع (yamayo TH-180). ويوضح الشكل (1) تجهيز عينات الخراطة للاختبار:



الشكل (1) تجهيز العينات قبل الاختبار

بارامترات عملية التشغيل:

أجريت في هذا البحث دراسة تأثير كلاً من سرعة القطع والتغذية في قساوة السطح المشغل (رطب وجاف) وتم تثبيت عمق القطع لأن تأثيره محدود في قساوة السطح من خلال التجربة، حيث تم تجريب ثلاثة قيم لكل بارامتر.

تم اختيار قيم السرعة وعمق القطع والتغذية وفقاً لإمكانات المخرطة المتوفرة في المخبر، وتم تكرار كل تجربة ثلاث مرات، وتم حساب المتوسط الحسابي لقيم القساوة لتقليل الخطأ التجريبي وضمان الثبات الإحصائي للنتائج، وتم تدوين النتائج، ويوضح الجدول (3) قيم بارامترات القطع المستخدمة في التشغيل:

جدول (3) قيم بارامترات القطع المستخدمة أثناء الخراطة

رقم	عمق القطع mm	قطر العينة D mm	التغذية mm/rev	سرعة الدوران RPM	سرعة القطع m/min
1	0.5	25	0.052	200	15.7
2			0.065	600	47.1
3			0.081	1000	78.5

تصميم Taguchi L9 :

تم اعتماد منهجية تصميم التجارب (Taguchi L9 Orthogonal Array) لتحديد تأثير أهم بارامترات القطع على القساوة السطحية للفولاذ AISI 1025، والحصول على دقة إحصائية عالية بأقل تكلفة وجهد. اعتمد التصميم على ثلاثة عوامل رئيسية، ولكل منها ثلاثة مستويات كما هو موضح في الجدول (4):

الجدول (4) المستويات التي اعتمدت في الاختبارات

الرمز	العامل	الوصف	المستويات المختارة
A	سرعة القطع (Cutting Speed)	سرعة دوران المخرطة (rpm)	200 – 600 – 1000
B	معدل التغذية (Feed Rate)	معدل الإزاحة الخطية للأداة (mm/rev)	0.052 – 0.065 – 0.081

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

جاف - تبريد هوائي - تبريد سائل (زيت+ماء)	نوع وسط القطع المستخدم	حالة التشغيل (Cutting Condition)	C
---	---------------------------	--	---

أُجريت تسع تجارب اعتمادًا على مصفوفة **Taguchi L9**، بدل من 27 تجربة مفترضة، حيث شمل كل عامل ثلاثة مستويات مختلفة لتحقيق تغطية إحصائية متوازنة للعوامل التشغيلية. والجدول (5) يبين ترتيب التجارب التسع المستخدمة في هذه الدراسة:

الجدول (5) ترتيب التجارب التسع التي تم اختيارها

الغرض من التجربة	حالة التشغيل	معدل التغذية (mm/rev)	سرعة القطع (rpm)	رقم التجربة
تقييم تأثير السرعة المنخفضة والتغذية الصغيرة على القساوة	جاف	0.052	200	1
دراسة أثر التبريد الهوائي عند السرعة المنخفضة	تبريد هوائي	0.065	200	2
قياس تأثير التغذية العالية مع السرعة المنخفضة	تبريد سائل	0.081	200	3
تحديد أثر السرعة المتوسطة والتبريد الجزئي	تبريد هوائي	0.052	600	4
تحديد التفاعل بين التغذية المتوسطة وسرعة متوسطة	تبريد سائل	0.065	600	5
اختبار تأثير التغذية العالية دون تبريد	جاف	0.081	600	6

فحص تأثير السرعة العالية مع أقل تغذية	تبريد سائل	0.052	1000	7
دراسة تأثير التغذية المتوسطة تحت السرعة العالية	جاف	0.065	1000	8
تحليل تأثير أعلى سرعة وتغذية مع تبريد هوائي	تبريد هوائي	0.081	1000	9

تمثل هذه التجارب التسع التصميم الكامل لطريقة (3³) Taguchi L9، التي تجمع بين ثلاثة مستويات لكل عامل من العوامل الثلاثة.

بعد تنفيذ جميع التجارب، تم إيجاد المتوسط الحسابي القساوة السطحية (HV) لكل عينة، وتحليل النتائج باستخدام طريقتي نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio) وتحليل التباين (ANOVA) لتحديد العوامل الأكثر تأثيراً والمستوى الأمثل لكل متغير.

4- النتائج والمناقشة:

بعد دراسة تأثير كلاً من التغذية سرعة القطع في قساوة السطح حصلنا على النتائج التالية في الجدول (6) التالي:

الجدول (6) نتائج تجارب Taguchi L9 لتأثير متغيرات القطع في القساوة السطحية

نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio, dB)	القساوة السطحية (HV)	حالة التشغيل	معدل التغذية (mm/rev)	سرعة القطع (rpm)	رقم التجربة
-40.67	108.0	جاف	0.052	200	1
-40.69	108.3	تبريد هوائي	0.065	200	2
-40.95	111.6	تبريد سائل	0.081	200	3
-41.34	116.6	تبريد هوائي	0.052	600	4

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

-40.99	112.3	تبريد سائل	0.065	600	5
-41.63	120.6	جاف	0.081	600	6
-41.95	115	تبريد سائل	0.052	1000	7
-42.14	128.0	جاف	0.065	1000	8
-42.00	126.0	تبريد هوائي	0.081	1000	9

❖ تحليل نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S/N Ratio):

تم حساب نسبة الإشارة إلى الضوضاء وفق معيار "الأقل هو الأفضل (Smaller-is-Better)" أي القساوة الأقل (لم تتغير مواصفات السطح) بهدف تحديد ثبات النتائج، وقد تبين أن أفضل أداء تحقق عند سرعة قطع منخفضة (200 rpm) ومعدل تغذية صغير (0.052 mm/rev)، مما يدل على استقرار العملية وجودة السطح الناتج. في المقابل، انخفضت قيم S/N (زادت القساوة) عند السرعات والتغذيات العالية، مما يشير إلى تباين أعلى في النتائج وزيادة الضوضاء التجريبية.

تم حساب قيم الضوضاء بناءً على العلاقة القياسية في طريقة تاجوشي:

$$\left(\frac{1}{2y} \sum \frac{1}{n} \right) 10^{\log \times 10} = S/N$$

N: عدد القراءات (3 تكرارات لكل تجربة)

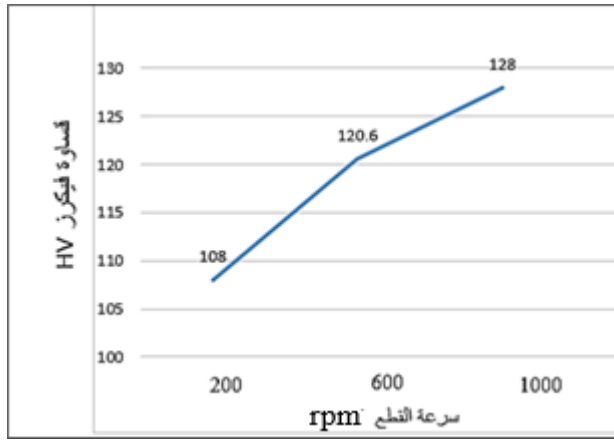
y: القيمة المقاسة للاستجابة (القساوة هنا)

يتضح أن القساوة تزداد تدريجياً مع ارتفاع سرعة القطع ومعدل التغذية، وتكون أعلى قيمها في حالة التشغيل الجاف، في حين تقل نسبياً عند استخدام التبريد السائل. هذا السلوك يعكس التفاعل بين الحرارة المتولدة أثناء القطع والعمل اللدن (plastic deformation) الذي يؤدي إلى تصلب السطح (work hardening).

4-1- تأثير سرعة القطع (Cutting Speed):

عند رفع سرعة القطع من 200 إلى 1000 rpm، ارتفعت القساوة السطحية من 108 HV إلى 128 HV تقريباً. هذه الزيادة تُعزى إلى ارتفاع درجة حرارة المنطقة المتأثرة بالقطع مع زيادة السرعة، مما يؤدي إلى زيادة في معدل التشوه اللدن للسطح. نتيجة ذلك، تحدث إعادة تبلور جزئية (partial recrystallization) وتكون حبيبات أدق، مما يزيد القساوة.

استنتاج: ارتفاع سرعة القطع يؤدي إلى زيادة القساوة السطحية كما يبين المنحني في الشكل (2):

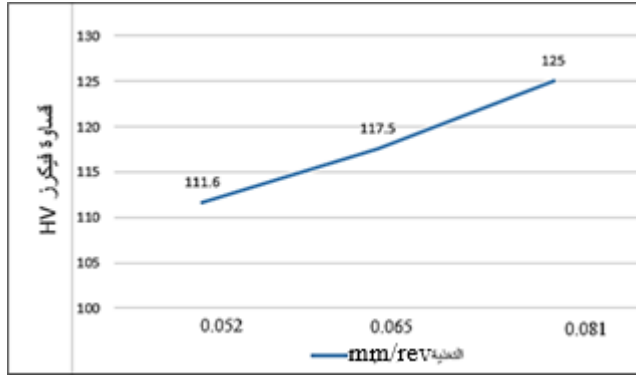


الشكل (2) المنحني البياني لتأثير سرعة القطع في القساوة السطحية

4-2- تأثير معدل التغذية (Feed Rate):

يُلاحظ ارتفاع القساوة بزيادة معدل التغذية من 0.052 إلى 0.081 mm/rev. هذا التأثير يُفسر بأن زيادة التغذية تؤدي إلى إزالة حجم أكبر من المادة في كل دورة، ما يولد قوى قطع أعلى وحرارة أكبر. هذه الحرارة الإضافية تُعزز التصلب السطحي من خلال زيادة الإجهادات المتبقية ورفع كثافة الانخلاعات (dislocations) داخل البنية البلورية.

استنتاج: تزداد القساوة السطحية تدريجياً مع زيادة معدل التغذية كما يبين المنحني في الشكل (3):



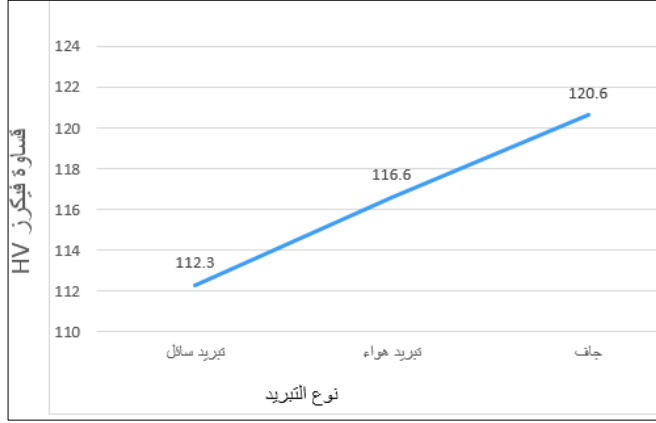
الشكل (3) المنحني البياني لتأثير معدل التغذية في القساوة السطحية

4-3- تأثير حالة التشغيل (Cutting Condition) :

بينت النتائج أن التشغيل الجاف أعطى قيم قساوة أعلى (حتى 128 HV) يليه التبريد الهوائي (126 HV)، ثم التبريد السائل (زيت+ماء) (112 HV) كأدنى قيمة. في التشغيل الجاف، ترتفع درجة الحرارة الموضعية بدرجة كبيرة، مما يحدث تصلباً سطحياً ملحوظاً بسبب التشوه اللدن. في المقابل، يؤدي استخدام التبريد السائل إلى تقليل الحرارة، فينتج سطح أقل إجهاداً حرارياً وبالتالي أقل قساوة.

استنتاج: التبريد يقلل القساوة بسبب انخفاض درجة الحرارة، بينما يزيد التشغيل الجاف القساوة نتيجة التسخين والتصلب الانفعالي كما يبين المنحني في الشكل (4):

الشكل (4) المنحني البياني لتأثير حالة التشغيل في القساوة السطحية



4-4- مقارنة نتائج البحث مع نتائج الدراسات السابقة:

نبين في الجدول التالي (7) مقارنة نتائج الدراسات السابقة بنتيجة البحث الحالي

الجدول (7) مقارنة نتائج الدراسات السابقة بالدراسة الحالية

رقم	الدراسة	نوع الفولاذ	ظروف القطع	أهم المتغيرات المدروسة	القساوة السطحية (HV)	ملاحظات رئيسية	المقارنة مع البحث الحالي
1	Zhou et al. (2020)	AISI 1025	تشغيل جاف	سرعة، القطع، التغذية	210 → 232	زيادة القساوة مع السرعة	مماثل للاتجاه الحالي
2	Singh & Garg (2021)	AISI 1040	تشغيل جاف	السرعة، التغذية	245 → 265	القساوة ترتفع مع زيادة السرعة	متفق جزئياً
3	Ebrahimi et al. (2021)	AISI 630	ساخن (300°C)	الحرارة، التغذية	235 → 260	التسخين المسبق يرفع القساوة بمقدار 25 HV	مشابه في الأثر الحراري

دراسة تأثير بارامترات القطع بالخراطة على قساوة الطبقة السطحية لمشغولات الفولاذ AISI 1025

متطابق في الاتجاه	التبريد يقلل القساوة	248 (جاف) → 229 (مبلل)	السرعة، التغذية	جاف/مبلل	فولاذ متوسط الكربون	Mandal & Paul (2022)	4
مماثل لنتائج البحث الحالي	التحليل ANOVA أظهر تأثيراً معنوياً للسرعة	225 → 250	السرعة، التغذية	تشغيل جاف	فولاذ منخفض الكربون	Kumar & Sharma (2023)	5
متوافق عملياً	القيم المثلثية عند سرعة متوسطة 200 م/د	240 → 265	السرعة، عمق القطع	تشغيل جاف	AISI 1045	Patel & Gohil (2023)	6
متشابه في الاتجاه العام	زيادة القساوة 12 عند HV رفع السرعة إلى 250 م/د	260 → 272	السرعة، التغذية	تشغيل جاف	AISI 316	Surya (2024)	7
متوافق	التغذية العالية تقلل القساوة	0.08)255 → (م/د) 0.24) 240 (م/د)	السرعة، التغذية	جاف/هوائي	فولاذ أوستنيتي	Kónya et al. (2024)	8
يتفق في الأثر الحراري العكسي	التبريد الجزئي رفع القساوة 20 HV	258 → 278	السرعة، التبريد	MQL	AISI 4340	Yaqoob et al. (2024)	9
نتائج مكملة تؤكد الاتجاه العام	القساوة الأعلى عند السرعة المرتفعة والتغذية المرتفعة	128 (جاف) 108 (ميرد)	السرعة، التغذية، التبريد	جاف/ميرد	AISI 1025	البحث الحالي (2025)	10

4-5- الاستنتاجات العامة من تحليل Taguchi :

1. سرعة القطع هي العامل الأكثر تأثيراً في القساوة السطحية بنسبة تأثير تقديرية $\approx 50\%$
2. معدل التغذية يأتي في المرتبة الثانية بتأثير نسبي $\approx 30\%$

3. حالة التشغيل لها التأثير الأقل (حوالي 20%)، لكنها تظل مهمة في ضبط استقرار العملية.
4. التشغيل الجاف يعزز التصلب السطحي، بينما التبريد السائل يقلله، ما يوفر مجالاً للتحكم في القساوة وفق نوع التطبيق الصناعي المطلوب.

4-6- التوصيات والمقترحات:

للحصول على سطوح مثالية أثناء عمليات التشغيل وبعد الانتهاء، بحيث يكون السطح قليل التغيرات من ناحية البنية وقساوة السطح يجب اتباع قواعد التشغيل والقيم المسموح بها من تغذية وسرع قطع واستخدام سوائل التبريد دائماً للمحافظة على عمر أداة القطع أولاً ثم المحافظة على بنية الطبقة السطحية للمشغولة دون تغيير.

القيم المثلى الموصى بها: سرعة قطع متوسطة ($600 \text{ rpm} \approx$) ، تغذية منخفضة (0.052 mm/rev)، واستخدام التبريد المستمر.

5- المراجع العملية:

1. Li, B., & Zhang, Y. (2019). Modeling of temperature and strain effects on surface hardness in turning operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9–12), 4529–4542.
2. Dash, L., Padhan, S., & Das, S. R. (2020). Experimental investigations on surface integrity and chip morphology in hard turning of AISI D3 steel under sustainable nanofluid-based minimum quantity lubrication. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(5), 236.
3. Zhou, Y., Wang, L., & Liu, Q. (2020). Surface integrity and mechanical performance of AISI 1025 steel in precision turning. *Procedia Manufacturing*, 53, 480–487.
4. Kumar, S., & Sharma, V. S. (2023). Optimization of machining parameters for surface integrity in turning of low-carbon steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 94, 118–127.
5. Ebrahimi, S. M., Hadad, M., & Araee, A. (2021). Influence of machining conditions on tool wear and surface characteristics in

- hot turning of AISI 630 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9–10), 2603–2618.
6. Singh, H., & Garg, R. (2021). Experimental study of surface hardness in dry turning of AISI 1040 steel. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2198–2205.
 7. Mandal, S., & Paul, S. (2022). Influence of cutting speed and feed rate on surface integrity of medium carbon steels under dry and wet conditions. *Wear*, 502–503, 204332.
 8. Yaqoob, S., Ghani, J. A., & Jouini, N. (2024). High-speed turning of AISI 4340 alloy steel using carbide tools in a sustainable MQL environment. *Industrial Lubrication and Tribology*, 76(4), 325–337.
 9. Rahman, H., Jouini, N., Ghani, J. A., & Rasani, M. R. M. (2024). A review of high-speed turning of AISI 4340 steel with minimum quantity lubrication (MQL). *Coatings*, 14(8), 1063.
 10. Zurita-Hurtado, O. J., et al. (2017). Surface hardness prediction based on cutting parameters in turning of annealed AISI 1020 steel. *DYNA*, 84(203), 31–36.
 11. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (6th ed.). Pearson Education.
 12. Groover, M. P. (2013). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (7th ed.). Wiley.
 13. Boothroyd, G., & Knight, W. A. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine Tools* (3rd ed.). CRC Press.
 14. Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
 15. Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
 16. Aouici, H., Yallese, M. A., Fnides, B., Chaoui, K., & Mabrouki, T. (2012). Modeling and optimization of hard turning of AISI H11 tool steel with CBN tool. *Measurement*, 45(3), 344–353.

17. Zidan, M. N. (2015). Reducing the friction factor using a three-directional coolant flow during alloy steel turning. *Journal of Damascus University for Engineering Sciences*, 31(1).
18. Talib, N. A. (2010). Studying the effect of cutting speed and feed rate on tool life in the turning processes. *Diyala Journal of Engineering Sciences – Special Issue, First Engineering Scientific Conference*, 181–194.