



دراسة تأثير نماذج المادة ونماذج الاحتكاك على متغيرات القطع العمودي باستخدام طريقة العناصر المحددة

عادل صالح علي عامر
كلية الهندسة، قسم الهندسة الصناعية والتصنيع، مصراتة، ليبيا
a.amer@eng.misuratau.edu.ly

عماد الدين عيسى الشوين
كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية، مصراتة، ليبيا
elshwion@cit.edu.ly

المخلص

- تستخدم عمليات قطع المعادن بشكل كبير في عمليات التصنيع، فقد أجريت العديد من الدراسات لتحليل هذه العملية المعقدة في الأبحاث الصناعية والأكاديمية، حيث يمكن التنبؤ بمتغيرات عمليات القطع مثل قوى القطع، ودرجات الحرارة، وتوزيع الإجهادات التي لها دورا كبيرا في تصميم الشكل الهندسي لأداة القطع وتعيين الظروف المثلى لمتغيرات عملية القطع، فالعديد من الأبحاث السابقة تم تنفيذها عن طريق التجارب العملية، وذلك لدراسة ومعرفة القيم المثلى لهذه المتغيرات، ومن المتعارف عليه أن تلك التجارب تتطلب جهدا، وتكلفة، وتستغرق كذلك زمن طويلا.

في الوقت الحاضر مع تطور الحواسيب وبرامج المحاكاة يمكن التنبؤ بمتغيرات القطع وتحديد القيم المثلى لها بدون الحاجة إلى تنفيذ العديد من التجارب العملية، وذلك باستخدام طريقة العناصر المحددة. في هذه الدراسة تم تنفيذ نمذجة ومحاكاة خراطة معدن من الصلب الكربوني (AISI 1045) بأداة قطع من كربيد التنجستن الغير مطلية (Uncoated Tungsten Carbide) باستخدام طريقة العناصر المحددة. تم تقسيم جزء المحاكاة إلى جزئين: في الجزء الأول، تم دراسة تأثير نماذج المادة على قوى ودرجة حرارة القطع، أما في الجزء الثاني فتم دراسة تأثير معاملات احتكاك القص ومعامل احتكاك كولوم على القوى ودرجات الحرارة المتولدة عند منطقتي القطع. حيث أظهرت النتائج أن نموذج المادة (Oxley) نتاجه أكثر دقة لمتغيرات القطع في عملية المحاكاة، وبالنسبة لتأثير الاحتكاك فإنه كلما زادت قيمة معامل احتكاك القص كانت قيم قوة الدفع ودرجات الحرارة قريبة من النتائج العملية، وعند استخدام قيمة أصغر لمعامل احتكاك كولوم أعطت نتائج أفضل للمحاكاة، لأن معامل الاحتكاك العالي يزيد من كمية التشوه في عنصر الشبكة أثناء عملية المحاكاة. وتبين أن النمذجة العددية الثلاثية الأبعاد في عمليات القطع تعطي تنبؤا دقيقا للقوى ودرجات الحرارة وغيرها من متغيرات العملية عند منطقة القطع.

استلمت الورقة بتاريخ 2023/9/15، وقبلت بتاريخ 2023/10/10، ونشرت بتاريخ 2023/11/10
الكلمات المفتاحية: قطع المعادن، التنبؤ، نمذجة ومحاكاة، العناصر المحددة، معامل الاحتكاك، (Oxley).

على أنها تقسيم نظام متسلسل أو متصل إلى عناصر صغيرة جدا، لتصف خصائص العنصر كمصفوفة ومن ثم تجميعها للوصول إلى نظام معادلات رياضية تُعطي الحل النهائي لسلوك النظام الكلي [5]. يتم استخدام العديد من البرامج التجارية والبحثية في محاكاة عمليات القطع من أهمها: (ABAQUS، LS-Deform 2D/3D، ynda، AdvantEdge وغيرها)، وفي هذه الدراسة تم استخدام برنامج DEFORM 3D لمحاكاة عملية قطع المعادن ثلاثية الأبعاد في عملية الخراطة، حيث يمكن لهذا البرنامج يستخدم لمحاكاة عملية قطع المعادن (خرطة- تفريز - ثقب)، وذلك بعمل افتراضات محددة لظروف القطع العمودي، بحيث تسمح للمبرمج بالمقدرة على التنبؤ بمخرجات عمليات القطع مثل: حسابات قوى القطع، ودرجات الحرارة، وشكل الرانش، وتآكل الأداة، وكذلك عمر أداة القطع، وذلك عند التغيير في ظروف ومحددات القطع مثل: سرعه القطع، ومعدل التغذية، وعمق القطع، والشكل الهندسي لأداة القطع.

يقوم برنامج DEFORM 3D بعمل تبسيط لتعريف نموذج المحاكاة لعملية خراطة المشغولة التي تكون في حالة دوران مع تقدم أداة القطع، وكذلك علاقتها مع بعضها البعض في التحليل [6]. تهدف هذه الدراسة لعمل نمذجة ومحاكاة عملية القطع المتعامد للمعادن باستخدام طريقة العناصر المحددة، (برنامج DEFORM 3D) وذلك عن طريق عملية خراطة معدن من الصلب الكربوني (AISI 1045)، حيث تم التحقق من تأثيرات نماذج مادة المشغولة على قوى القطع، ودرجات الحرارة، بالإضافة إلى تأثير معاملات الاحتكاك على مخرجات عملية

1. المقدمة

تُعدّ عمليات تشغيل المعادن واحدة من أكثر تقنيات الإنتاج استخدامًا في الصناعة، وذلك بتحويل كتل المعادن إلى الأشكال المطلوبة بجودة عالية للأسطح ودقة في الأبعاد، حيث تتم هذه العملية بواسطة تكوين رانش المعدن. تعتبر الدراسات التحليلية لعمليات القطع قديمة جدا، حيث تصل إلى مئات السنين [1]. وقد بدأت الأبحاث المبكرة في دراسة آليات قطع المعادن سنة 1851 والتي كانت مركزة في تحويل حجم معين من المادة بواسطة الثقب، وفي عام 1873 قام (Tresca) بأول محاولة لشرح كيفية تكوين الرانش في عملية القطع، ومن أشهر النماذج المبسطة التي تشرح آلية القطع والتي قدمت من قبل (Ernest and Merchant) [2,3]. كما قُدمت العديد من الدراسات البحثية بتطوير نمذجي (Ernest and Merchant)، وفي سنة 1963 قُدمت أول دراسة لنموذج القص المتوازي لتشكيل الرانش من قبل (Oxley and Welsh) [4].

إنّ التجارب العملية لدراسة عمليات التشغيل تكون مكلفة وتستغرق وقتًا طويلاً وخاصة عندما تتضمن مجموعة كبيرة من المتغيرات مثل الشكل الهندسي لأدوات القطع، والمواد المستخدمة، وظروف عملية القطع. بسبب هذه الصعوبات تم تطوير طرق رياضية بديلة لعمليات المحاكاة، وتعتبر طريقة العناصر المحددة (FEM) من أهم الطرق العددية التي تستخدم على نطاق واسع في التحليلات الهندسية، وتعرف طريقة العناصر المحددة

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n \quad \text{--->} \quad (1)$$

حيث σ إجهاد الانسياب، ε الانفعال، σ_1 هو إجهاد الانسياب للمادة عند قيمة انفعال $\varepsilon = 1.0$ ، و n هو أس التصلد الانفعالي الصلب [9].

2. نموذج جون وكوك للمادة (Johnson and Cook Material Model)

قام كلا من جونسون وكوك (1993) بتطوير نموذجًا للمادة يعتمد على اختبار (dynamic Hopkinson bar test) من خلال مجموعة كبيرة من معدلات الإجهاد ودرجات الحرارة، حيث أخذت معادله هذا النموذج إلى الصورة التالية:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad \text{--->} \quad (2)$$

حيث:-

الحد الأول بين القوسين في المعادلة: يمثل التصلد الانفعالي (المرن-اللدن).
أما الحد الثاني بين القوسين: يبين إجهاد الانسياب للمادة عندما تتعرض المادة لمعدلات انفعال عالية (اللزوجة).
وبالنسبة للحد الأخير بين القوسين: يمثل مدى درجة حرارة الليونة، والرموز:-

A: مقاومة الخضوع (MPa).

B: معامل التصلد أو الصلادة (MPa).

C: ثابت حساسية معدل الانفعال.

m: معامل التلين الحراري.

n: معامل التصلد الانفعالي.

$\dot{\varepsilon}$: الانفعال اللدن (1/s).

$\dot{\varepsilon}_0$: معدل الانفعال (1/s).

T: درجة الحرارة اللحظية (°C).

Tr: درجة حرارة الغرفة (°C).

Tm: درجة حرارة انصهار مادة المشغولة (°C) [10].

نموذج زيليري و أرمسترونج (Zerilli and Armstrong Material Model)

قام كلا من (Zerilli & Armstrong) بتطوير معادلتين أساسيتين للمواد ذات البناء البلوري متركز الوجه (F.C.C)، والمواد ذات البناء البلوري متركز الجسم (B.C.C)؛ لتحليل درجة حرارتها، والاستجابة لمعدل الإجهاد العالي، وقد تم ملاحظة وجود فرق كبير بين هذه المواد؛ لذلك تم تطوير نموذج لإجهاد الانسياب للمعادن ذات البناء البلوري متركز الجسم B.C.C.. النحو التالي:

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp \left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + C_5 \varepsilon^n \quad \text{--->} \quad (3)$$

ومعادلة نموذج الإجهاد الانسيابي للمعادن ذات البناء البلوري متركز الوجه (F.C.C) تم تعريفها بالمعادلة التالية:

$$\sigma = C_0 + C_2 \varepsilon^{-1/2} \exp \left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + C_5 \varepsilon^n \quad \text{--->} \quad (4)$$

حيث:

C₀: معامل الإجهاد التي تأخذ في الاعتبار كثافة الانخلاع عند إجهاد الانسياب.

المعاملات: من C₁ إلى C₅.

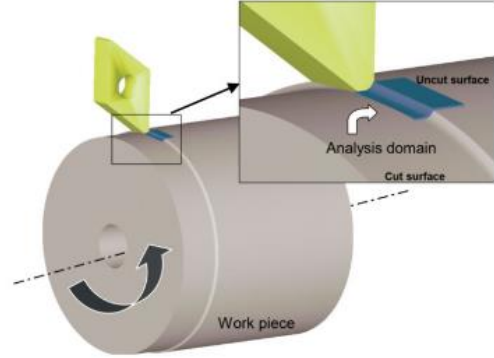
n: ثوابت المادة.

T: درجة الحرارة المطلقة.

ملاحظة: - في المعادلة (3) من المفترض أن الانفعال يعتمد على إجهاد الانسياب ولا يتأثر بمعدل الانفعال، بينما يكون العكس صحيح في المعادلة (4) [11].

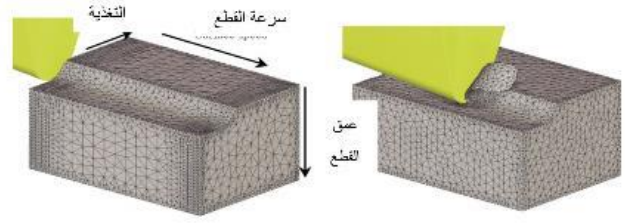
ب. نماذج الاحتكاك (Friction Model)

القطع مثل قوى ودرجة الحرارة عند منطقة القطع، ومقارنة نتائج المحاكاة مع القيم العملية، ويبين الشكل (1) المكونات الأساسية في عملية الخراطة باستخدام برنامج DEFORM 3D وعلاقتها مع بعضها البعض في مجال التحليل.



شكل (1) المكونات الأساسية في عملية الخراطة باستخدام برنامج DEFORM 3D وعلاقتها مع بعضها البعض في مجال التحليل [6]

ويبين الشكل (2) نموذج المحاكاة وتعريف متغيرات القطع الأساسية



شكل (2) نموذج المحاكاة وتعريف متغيرات القطع الأساسية [6]

كما توضح نتائج التجارب العملية للمحاكاة بالجدول (1) جدول (1) نتائج التجارب العملية

745	Fc (N)
600	Ft (N)
542	T(°C)

2. المحاكاة بطريقة العناصر المحددة لقطع المعادن

تتركز الأبحاث في عمليات قطع المعادن على تحديد أفضل ظروف القطع من حيث: الشكل الهندسي لأداة القطع؛ للحصول على عملية ذات كفاءة عالية، وكذلك للحصول على نتائج جيدة.

يتحتم القيام بتجارب عملية والتي عادة ما تكون مكلفة وتستغرق وقتًا طويلاً. بالإضافة إلى ذلك، فإن الطرق التحليلية يصعب تطبيقها في العمليات المعقدة؛ وبالتالي تعتبر الطرق العددية من أفضل الطرق في التحليل، بالإضافة على قدرتها على تقليل الزمن الحسابي، وتعتبر طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method) والتي يرمز لها بالرمز (FEM) من أفضل الطرق العددية المستخدمة في عمليات القطع [8]. ومن نماذجها:-

أ. نماذج مادة المشغولة (Work Material Models)

وهي من أهم الأنواع وتستخدم على نطاق واسع في محاكاة عمليات قطع المعادن وهي: نموذج (Oxley Material Model) ونموذج (Johnson and Cook Material Model)، ونموذج (Zerilli and Armstrong Material Model) وهي كالتالي:

1. نموذج أوكسلي للمادة (Oxley Material Model)

تم استخدام نموذج أوكسلي للمادة (1990) قانون القدرة لتمثيل إجهاد الانسياب (flow stress) للصلب الكربوني كما موضح أدناه:

3. إعداد البيانات الأولية لنمذجة عملية المحاكاة

تم استخدام برنامج (DEFORM-3D) في محاكاة عملية الخراطة والذي يعتمد على معادلة (Lagrangian)؛ وذلك لدراسة تأثير نماذج المادة ومعاملات الاحتكاك على القوى، ودرجات الحرارة في منطقة القطع، حيث استخدمت لقمة أداة قطع نوع كربيد التنجستن الغير مطلية نوع (TNMA-332) مع حامل الأداة نوع (DTGNL) لقطع مادة مشغولة من الصلب (AISI 1045) والذي يستعمل بشكل كبير في المنشآت المعدنية والمثبتات الميكانيكية، والجداول (2)، و (3)، و (4) تُوضّح المتغيرات المطلوبة لعملية المحاكاة، وخواص المشغولة، وأداة القطع.

جدول (2) المتغيرات الداخلة في عملية المحاكاة [14]

100	سرعة القطع Vc (m/min)
0.1	معدل التغذية f (mm/rev)
3	عمق القطع d (mm)
27	درجة حرارة المحيط (C°)
0.805-0.7 ، 0.6 ، 0.5-0.4	معاملات الاحتكاك القصي
0.8 ، 0.7 ، 0.6-0.5	معاملات احتكاك كولوم
45	معامل انتقال الحرارة عند منطقة القطع (N/sec/mm°C)

جدول (3) الشكل الهندسي وخواص المشغولة [15]

7.00	طول المشغولة (mm)
5.00	عرض المشغولة (mm)
210	معامل المرونة GPa
50.00	الموصلية الحرارية (W/m. °C)
12.00	معامل التمدد الحراري (10 ⁻⁶ °C)
3.70	السعة الحرارية (N/mm ² .°C)

جدول (4) الشكل الهندسي وخواص أداة القطع [16]

0.05	الشكل الهندسي لأداة لقطع نصف قطر أداة القطع (mm)
5	زاوية الخلوص (°)
0	زاوية الجرف الخلفية (°)
-5	زاوية الجرف الجانبية (°)
(Uncoated)	خواص أداة القطع لمادة كربيد التنجستن WC الغير مطلية
640	معامل المرونة E(GPa)
0.28	نسبة بوبين
2450	إجهاد الخضوع (MPa)
3450	الإجهاد الأقصى (MPa)
2.95 × 10 ⁶	السعة الحرارية النوعية (J/m ³ k)
80	الموصلية (W/m k)
0.45	الاستطالة

المحاكاة:-

تم تنفيذها بعدة مراحل في توليد الشبكة (Mesh Generation) بحجم عنصر 4، بحيث استخدمت عناصر ثلاثية نسبة لأداة القطع والتي عددها حوالي (38874).

أما الظروف الحدية الحرارية للنظام المطبق على الشبكة لأداة القطع فإن السطح البعيد من سطح الجرف يُطبق عليه درجة محددة، وباقي السطوح يطبق عليها التبادل الحراري مع الظروف الحدية للبيئة المحيطة كما في الشكل (4) أثناء التحليل.

صيغة نموذج (Langrangian) المحدثة سوف تستخدم عند إعادة توليد الشبكة، ويتم تنفيذ انسياب الرانش بإعادة توليد الشبكة بحيث إن البرنامج لا يحتاج إلى استخدام معيار الفصل (Separation) Criterion عند وجود العنصر المشوه.

نمذجة الاحتكاك لها دور مهم في إظهار النتائج الدقيقة، مثل قوى القطع، ودرجة الحرارة، وتآكل الأدوات في محاكاة عملية قطع المعادن. حيث تركّزت الأبحاث في تحديد نموذج الاحتكاك لتمثيل السلوك الحقيقي لعملية القطع، ومن هذه النماذج ما يلي:

1. ثابت كولوم (Constant Coulomb)

في محاكاة عملية قطع المعادن القديمة تم استخدام نموذج الاحتكاك البسيط (Coulomb) في منطقة الاتصال بين الرانش وأداة القطع بأكملها مع معامل الاحتكاك الثابت. وتم تعريف هذا النموذج بالمعادلة التالية:

$$\tau = \mu \times \sigma_n \quad (5)$$

حيث:

τ : إجهاد الاحتكاك.

σ_n : الاجهاد العمودي.

μ : معامل الاحتكاك. [12]

2. القص الثابت (Constant Shear)

في نموذج احتكاك القص الثابت، يُفترض أن يكون إجهاد الاحتكاك على سطح الجرف للأداة ثابتاً، كما أنّ الاختلاف في الإجهادات العمودية والقصية (σ , τ) يكون بسيطاً ويمكن إهماله؛ وبالتالي يمكن استخدام المعادلة التالية:

$$\tau = m \times k \quad (6)$$

حيث:

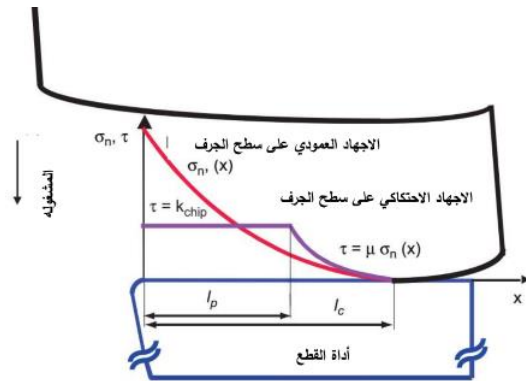
m : معامل الاحتكاك.

k : إجهاد الانسياب القصي لأداة القطع [12].

3. القص الثابت في منطقة الالتصاق وكولوم في منطقتي الانزلاق.

وفقاً للعالم (Zorev) عام 1963، تحدثت منطقتين احتكاك على سطح الجرف للأداة، تكون المنطقة الأولى هي منطقة الالتصاق حيث يكون الإجهاد الاحتكاكي ثابتاً، أما المنطقة الثانية هي منطقة الانزلاق حيث يكون الإجهاد العمودي صغيراً، لذلك يمكن استخدام نموذج احتكاك القص الثابت في منطقة الالتصاق، ونظرية كولوم في منطقة الانزلاق لنمذجة ومحاكاة ظاهرة الاحتكاك.

والشيء المهم في استخدام هذا النموذج هو تحديد الطول لمنطقة الالتصاق والانزلاق. فعادة ما يكون على طول خط التماس بين الرانش والأداة القريبة من حافة القطع، والتي تكون عندها منطقة الالتصاق وفيها إجهاد القص الاحتكاكي عند هذه المنطقة مساوياً لمتوسط إجهاد القص عند منطقة تداخل بين الرانش والأداة كما هو موضح في الشكل (3)، بينما منطقة الانزلاق تكون في منطقة التداخل بين الرانش والأداة، والإجهاد الاحتكاكي يمكن الحصول عليه باستخدام معامل الاحتكاك [13].



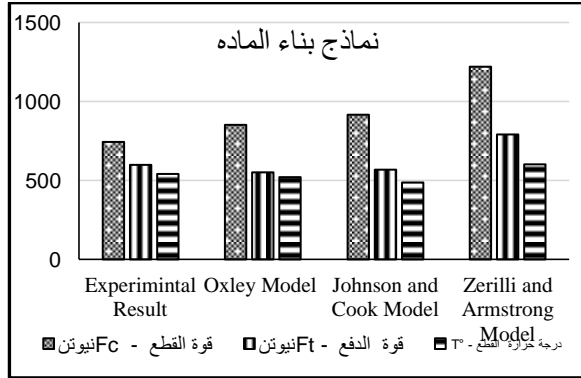
شكل (3) توزيع الإجهادات العمودية والاحتكاكية على سطح الجرف للأداة [12].

- في حالة تم اختيار عدد كبير من الخطوات للمحاكاة فإن معيار إنهاء المحاكاة يكون اعتماده دائما على طول القطع المُحدّد في البرنامج.
- نموذج احتكاك أداة القطع الذي استخدم في المحاكاة هو: نموذج يوسبي (Ususi's Model).
- إن معدل التآكل علاقته بثابت الاجهاد، والسرعة النسبية، ودرجة الحرارة المطلقة عند سطح التماس، وثوابت نموذج معدل التآكل تأخذ القيم: $a = 78 \times 10^{-10}$ ، والمتغير $b = 5302$ [16].

4. مناقشة النتائج والاستنتاجات

أ. مقارنة نماذج المادة (Comparison of Material Models)

- في هذه الدراسة تم استخدام ثلاثة نماذج مختلفة للمادة في المحاكاة، مع استخدام معامل احتكاك قيمته (0.8053) ثابتة لجميع النماذج.
- الشكل (6) يوضح تأثير نماذج مادة البناء على قوى القطع والدفع، واتضح أنّ نموذج Oxley أعطى قيمة بنينبو لقوى القطع قريبة من القيمة المعملية (جدول (1)) وأكثر دقة من النموذجين الآخرين.
- قيم قوى الدفع في نماذج (Johnson-Cook، Oxley) في برنامج المحاكاة (D-Deform 3) كانت قريبة نوعا ما القيم المتحصل عليها من التجارب المعملية.
- في نموذج (Zerilli-Armstrong) كانت قيمة النتائج بعيدة نوعا ما مقارنة بالقيم المعملية.
- قيم درجات الحرارة في محاكاة قطع المعادن تتأثر بشكل أساسي بنماذج الاحتكاك، ومعاملات الاحتكاك، ومعاملات التداخل، وانتقال الحرارة للمادة ودقة المتغيرات الحرارية للمشغولة وأداة القطع كما موضحة في الشكل (6)، حيث يمثل المحور السيني نماذج بناء المادة، والمحور الصادي القوى بالنيوتن.



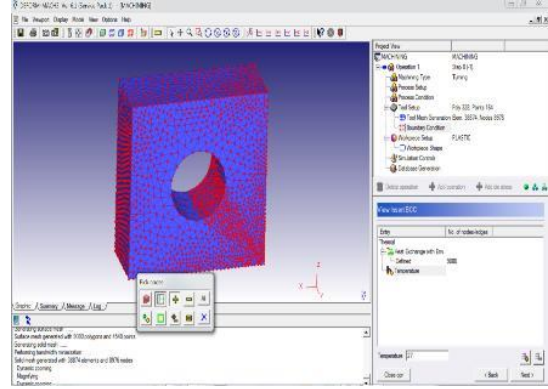
شكل (6) تأثير نماذج بناء المادة على القوى ودرجة الحرارة عند منطقة القطع.

ب. مقارنة نماذج الاحتكاك

- في هذا الجزء من الدراسة تم تطبيق نماذج احتكاك كولوم، واحتكاك القص مع معاملات ثابتة في نموذج العناصر المحددة.
- تم تطبيق نموذج مشترك لاحتكاك القص في منطقة الالتصاق ومعامل كولوم الثابت في منطقته الانزلاق.
- كلا من هذه المعاملات المختلفة يتم اختبارها للحصول على أفضل قيمة تقترب من النتائج المعملية (جدول (1))، حيث تم استخدام نموذج بناء المادة (Oxley) في جميع عمليات المحاكاة لمقارنة نماذج الاحتكاك جميعها.

تأثير نموذج احتكاك القص على قوى ودرجة حرارة القطع

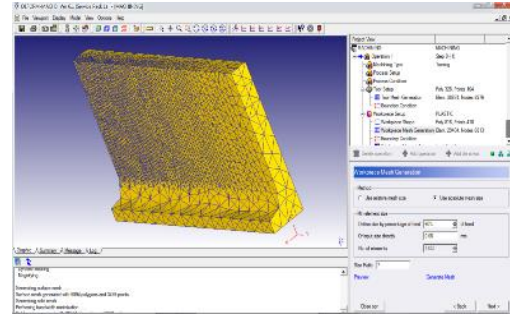
- تأثير معاملات احتكاك القص على قوة القص وقوة الدفع موضحة في الشكل (7)، حيث أنّ قيم قوى القطع في المحاكاة عند أخذ معاملات الاحتكاك بقيم: (0.7، 0.8053)، كانت مُتفاوتة نوعا ما عنها في القيم المعملية (جدول (1)).
- أفضل قيمة تقديرية هي (N 741) عندما يكون معامل احتكاك القص مساويا للقيمة (0.6)، بينما قيم نتائج المحاكاة لقوة الدفع كانت بعيدة عن التقدير مقارنة بالقيم المعملية لمعامل احتكاك بقيمة (0.6).
- أفضل قيمة تقديرية لقوة الدفع عندما كان معامل احتكاك القص بقيمة (0.8053).



شكل (4) الظروف الحدية الحرارية لأداة القطع

إنّ نمذجة إجهاد الانسياب لمادة المشغولة مهمة جدًا للحصول على نتائج مقبولة في محاكاة قطع المعادن.

- تم توليد الشبكة بنسبة 60% من قيمة التغذية.
- خلال عملية المحاكاة، تم افتراض أنّ المشغولة لا يحدث لها تشوه مرن، ويحدث لها فقط سلوك لدن.
- شبكة العنصر المحدد للمشغولة تمّ نمذجتها باستخدام "6813" عقده، وعناصر رباعية عددها "29404".
- الشبكة في منطقته التشوه تمّ نمذجتها بشبكة تكون ذات كثافته عالية؛ وذلك للتقليل الزمن الحسابي والحصول على نتائج أدق، كما موضحة أدناه في الشكل (5).



شكل (5) إعدادات وتوليد الشبكة للمشغولة

ملاحظة:- معاملات مادة المشغولة (Johnson-Cook، Zerilli-Armstrong) موضحة في الجدول (5)، والجدول (6)، وهذه المعاملات تستخدم لحساب قيم إجهاد الانسياب لنماذج المادة.

جدول (5) معاملات نموذج Johnson-Cook [17]

A	B	C	N	M	Tm (K°)
553.1	600.8	0.0134	0.234	1	1733

جدول (6) معاملات نموذج Zerilli-Armstrong [17]

C ₀ (MPa)	C ₁ (MPa)	C ₃ (K ⁻¹)	C ₄ (K ⁻¹)	C ₅ (MPa)	N
159.2	1533.7	0.00609	0.000189	742.6	0.171

- إنّ تحديد النّحْم بالمحاكاة يتضمّن عدد من الخطوات: - تصل إلى أكثر من (1000 steps).
- الخطوات تُخزّن بـ 25 خطوة في كلّ جزء.
- يتم تحديد طول القطع (7mm) حسب تشغيل Lagrangian الأولي.

جدول (6) النموذج المشترك بين معامل احتكاك القص الثابت في منطقة الالتصاق واحتكاك ثابت كولوم في منطقة الانزلاق

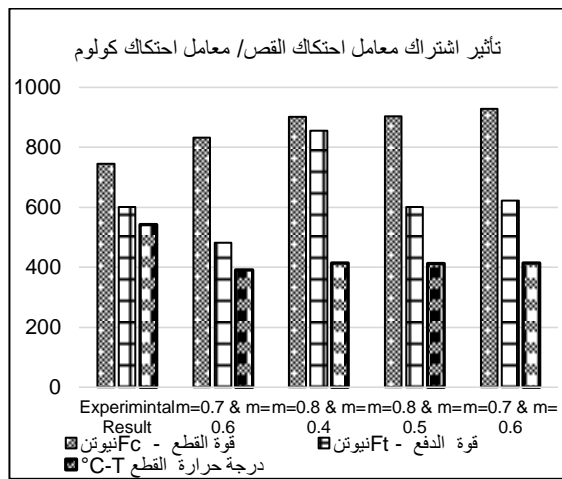
رقم النموذج	معامل احتكاك كولوم	معامل احتكاك القص
1	m=0.7	$\mu=0.6$
2	m=0.8	$\mu=0.4$
3	m=0.8	$\mu=0.5$
4	m=0.8	$\mu=0.6$

نتائج المحاكاة:-

- إن نتائج المحاكاة لقوى القطع في جميع النماذج كانت بعيدة نوعاً ما عن القيم المتحصل عليها من التجارب، حيث كانت أفضل قيمة لقوة القطع (Fc) هي للنموذج رقم (1).

- قوة الدفع كانت قريبة من القيم المعملية في النماذج (1، 2).

- قوة الدفع حققت قيمة محاكاة مقدارها N600 كما موضحة بالمحور الصادي، وهي قريبة من قيمة قوة الدفع في التجارب المعملية بالنموذج رقم (3)، كما في الشكل (9).



شكل (9) تأثير معامل احتكاك كولوم ومعامل احتكاك القص على القوى ودرجة الحرارة عند منطقة القطع.

5. الخلاصة:-

- النمذجة العددية الثلاثية لأبعاد في عمليات الخراطة تكون مهمة للتنبؤ الدقيق بقوى القطع ودرجات الحرارة.

- في هذه الدراسة، تم تمثيل النموذج (الميكانيكي - الحراري) للانفعال المستوي للقطع العمودي بتشكيل رانش مستمر، حيث أن النموذج المطور قادر على التنبؤ بقوى القطع والدفع وتوزيع درجات الحرارة في منطقة القطع.

- تم تطبيق ثلاثة نماذج للمادة، وتم مقارنة نتائج البرنامج مع القيم المتحصل عليها من التجارب المعملية (الجدول (1) من ورقة بحثية سابقة [7]، حيث أن نموذج إجهاد الانسياب له التأثير الأساسي على نتائج الحسابات، وأوضحت نتائج الجزء الأول من الدراسة الآتي:-

- أن نموذج المادة (Oxley) يعطينا نتائج أكثر دقة لمتغيرات القطع في عملية المحاكاة.

- نتائج المحاكاة لقوى الدفع باستخدام نماذج بناء المادة (Johnson-Zerilli-Armstrong، Cook) تكون قيمة قوة الدفع قريبة من النتائج المعملية مقارنة بنموذج بناء المادة (Oxley).

- أما في الجزء الثاني من الدراسة لنماذج معاملات الاحتكاك فلها تأثير كبير على قوى القطع، والدفع، ودرجة الحرارة عند منطقة القطع ومن أهمها:

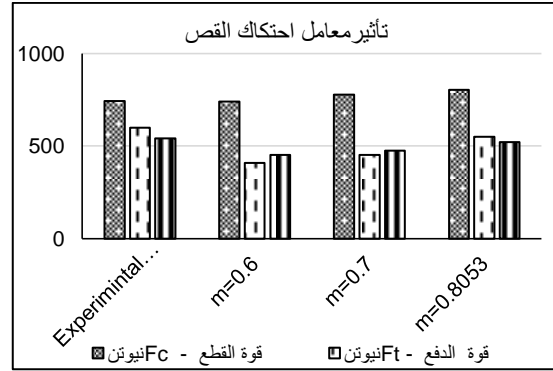
- يجب تجربة أكثر من معامل احتكاك، للحصول على نتائج أكثر دقة في المحاكاة.

- كلما زادت قيمة معامل الاحتكاك، تكون قيم قوة الدفع، ودرجات الحرارة قريبة من النتائج المعملية.

- الشكل (7) يوضح النتائج المتوقعة لدرجات الحرارة باستخدام برنامج المحاكاة (D-DEFORM3) بقيم مختلفة لمعاملات احتكاك القص.

- إن جميع القيم كانت بعيدة التقدير عن القيم المعملية، والسبب المحتمل لهذا الاختلاف نتيجة حقيقة أن درجة حرارة العملية المتحصل عليها في زمن قطع قصير جداً والذي لا يعطي الوقت الكافي للوصول لدرجة حرارة حالة الاستقرار أثناء عملية المحاكاة

- من الملاحظ أن أفضل قيمة لمحاكاة درجات الحرارة عندما كان معامل احتكاك القص للقيمة تساوي (0.8053)، كما موضحة على المحورين الصادي والسيني على التوالي).

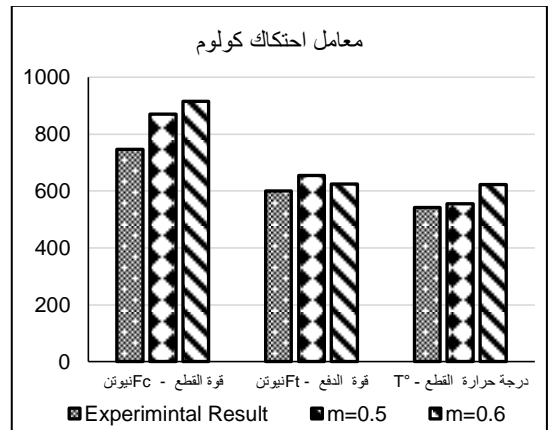


شكل (7) تأثير معامل احتكاك القص على القوى ودرجة الحرارة عند منطقة القطع.

2. تأثير معامل احتكاك كولوم على قوى ودرجة حرارة القطع

- القيم المتحصل عليها من برنامج المحاكاة لقوة القطع، وقوة الدفع مع معاملات احتكاك كولوم المختلفة موضحة في الشكل (8)

- قوة القطع كانت قريبة من النتيجة المعملية عند قيمة ($\mu=0.5$)، وبعيدة عن النتائج المعملية عند استخدام معامل احتكاك ($\mu=0.6$)، بينما درجات الحرارة كانت قريبة من النتائج المعملية عندما كان معامل الاحتكاك ($\mu=0.5$) كما هو موضح في الشكل (8)، حيث يمثل المحور السيني معامل احتكاك كولوم، والمحور الصادي يبين قيمتي قوة القطع ودرجات الحرارة.



شكل (8) تأثير معامل احتكاك كولوم على القوى ودرجة الحرارة عند منطقة القطع.

3. تأثير اشتراك معامل الاحتكاك القص، واحتكاك ثابت كولوم في المحاكاة للعناصر المحددة

في استخدام النموذج المشترك الذي يتضمن نماذج احتكاك كولوم والقص، يفترض أن يكون طول منطقة الالتصاق ثابتة وتساوي ضعف سمك الرانش الغير مقطوع، والجدول (6) يوضح النموذج المشترك لمعامل احتكاك القص واحتكاك ثابت كولوم.

- عند استخدام نموذج احتكاك كولوم، فإنه يعطي نتائج غير دقيقة لقوى القطع، وأيضاً درجات الحرارة مقارنة بالنتائج العملية، وبالتالي استخدام معامل احتكاك صغير يُعطي نتائج أفضل للمحاكاة عند استخدام نموذج احتكاك كولوم.

- من الملاحظ عند استخدام معامل احتكاك عالي، أنه يسبب تشوه عالي في عنصر الشبكة أثناء عملية التحليل والمحاكاة، لأن معاملات الاحتكاك المُتحصّل عليها من المعادلات التحليلية السابقة الذكر لا تستخدم في محاكاة العناصر المتناهية في قطع المعادن.

- في الدراسات المستقبلية يمكن استخدام برنامج (DEFORM-3D) في دراسة متغيرات عملية القطع مثل السرعة القطع، معدل التغذية وعمق القطع على قوى القطع ودرجات الحرارة المتولدة في منطقة القطع بالإضافة إلى دراسة معدل تآكل أداة القطع. كما يمكن استخدام هذا البرنامج في تأثير زوايا الجرف والخلوص ونصف قطر أداة القطع على قوى القطع ودرجات الحرارة المتولدة والاجهادات المتبقية في منطقة القطع.

6. المراجع

- [1] Astakhov, V.P. Machining. London: Springer. 2008.
- [2] Tresca, H.. On Further Applications of the Flow Solids. Proc. I. Mech. E. Lond. 1878, (1): 301-345.
- [3] Ernest, H. and Merchant, M.E. Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surfaces. Transactions of American Society for Metals. 1941, (29): 299-378.
- [4] Oxley, P.L.B. Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability. Journal of Applied Mechanics. 1990, 57: 253.
- [5] Cook, R.D., Malkus, D.S., and Plesha, M.E. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York: John Wiley & Sons . 1989.
- [6] Deform™ Machining (turning) Lab, scientific forming technologies corporation.
- [7] Filice, L., Micari, F., Rizzuti, S. and Umbrello, D., 2007. A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(3-4), pp.709-714.
- [8] Angelos P. Markopoulos. Finite Element Method in Machining Processes. Springer. 2013.
- [9] Oxley, P.L.B. Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability. Journal of Applied Mechanics . 1990, 57: 253.
- [10] Johnson, G.R. and Cook, W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain-rates and High Temperatures. Seventh International Symposium on Ballistics. 1993, (7): 541-547.
- [11] Zerilli, F.J. and Armstrong, R.W. Dislocation 1[1 Mechanics Based Constitutive Relations for Materials