Ly. J. Appl. Sci. Tech. V. 14, No (1) Ar. 1-8
مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية
https://ljast.ly/

تأثير التغير التدريجي لسرعة الكبّاس على الترقق والارتداد المرن في السحب العميق باستخدام العناصر المحدودة

علي محمد أحمد الغويل *

[1]قسم هندسة التصنيع - كلية التقنية الصناعية – مصراته، ليبيا

* المؤلف المراسل: Ali75lby@cit.edu.ly

الملخص

تُعد عملية السحب العميق من العمليات الرئيسة في تشكيل الصفائح المعدنية لإنتاج الأجزاء ثلاثية الأبعاد المستخدمة في صناعات متعددة، مثل السيارات والأجهزة المنزلية. ومن أبرز التحديات المرتبطة بهذه العملية الحفاظ على تجانس توزيع السمك وتقليل ظاهرة الارتداد المرن، لما لهما من تأثير مباشر في جودة المنتج النهائي. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير تغيير سرعة الكبّاس تدريجيًا أثناء عملية السحب العميق على توزيع السمك والارتداد المرن باستخدام برنامج ***ABAQUS*** بالاعتماد على طريقة العناصر المحددة. تم إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد للعملية مع تعريف الخواص الميكانيكية للمادة، ومعامل الاحتكاك، وأبعاد القالب، ثم تطبيق سرعات كبّاس متدرجة ومقارنتها بحالة السرعة الثابتة. أظهرت النتائج أن السرعة المتدرجة حسّنت توزيع السمك بنسبة تقارب 5% مقارنة بالسرعة الثابتة، بينما حقّقت السرعة العالية الثابتة أقل قيمة للارتداد المرن بإنخفاض 9.5% مقارنة بحالة التخفيض التدريجي للسرعة. كما ساعد التحكم بالسرعة في تقليل تركّز الإجهادات في المناطق الحرجة، خاصة عند الزوايا. تؤكد الدراسة أهمية المحاكاة العددية في تحسين ظروف التشغيل وتقليل الكلفة ورفع جودة المنتجات الصناعية النهائية.

بيانات البحث

استقبل: 2026/05/08
قبل للنشر: 2026/06/11
نشر الكترونيا: 2026/06/23

الكلمات المفتاحية:

السحب العميق
توزيع السمك،
الإرتداد المرن،
سرعة الكبّاس،
ABAQUS

Effect of Gradual Punch Speed Variation on Thinning and Springback in Deep Drawing Using Finite Element Analysis

Ali Mohamed Elghawail

Manufacturing Department- College of Industrial Technology – Misurata, Libya

Deep drawing is one of the primary sheet metals forming processes used to manufacture three-dimensional components for various industries such as automotive and household appliances. Among the major challenges associated with this process are maintaining uniform thickness distribution and reducing springback, due to their direct effect on the quality of the final product. This study aims to analyze the effect of gradually varying punch speed during the deep drawing process on thickness distribution and springback using **ABAQUS** software based on the finite element method (FEM). A three-dimensional numerical model of the process was

© *The Author(s) 2026.*
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

developed by defining the mechanical properties of the material, friction coefficient, and die geometry. Different gradually varying punch speeds were applied and compared with the constant punch speed condition. The results showed that the gradual speed variation improved thickness distribution by approximately **5%** compared with constant speed case, However, the high constant punch speed achieved the lowest springback value, reducing it by **9.5%** compared with the gradual speed reduction condition. Furthermore, Speed control contributed to reducing stress concentration in critical regions, particularly at corner areas. The findings highlight the importance of numerical simulation as an effective tool for optimizing process parameters, reducing manufacturing cost, and improving the quality of final industrial products.

Keywords:
Deep drawing; thickness distribution; springback; punch speed; ABAQUS;

1. المقدمة

تمثل تقنية السحب العميق إحدى العمليات الأساسية في تشكيل الأجزاء المعدنية، إذ تتيح تحويل الألواح المسطحة إلى أشكال ثلاثية الأبعاد في العديد من التطبيقات الصناعية مما يجعلها ضرورية في العديد من التطبيقات الصناعية، مثل صناعة السيارات، الأجهزة المنزلية، الطائرات، والخزانات المعدنية. وتعتمد جودة المنتج النهائي في هذه العملية على مجموعة من المعلمات التشغيلية والميكانيكية التي تؤثر بشكل مباشر في سلوك المادة أثناء التشكيل. تعد سرعة الكباس ومعامل الاحتكاك بين الصفيحة والقالب من أهم معلمات التشغيل المؤثرة في عملية السحب العميق، بينما يُستخدم كل من توزيع السمك ومقدار الارتداد المرن كمؤشرين أساسيين لتقييم جودة المنتج النهائي. وتّعد مشكلة عدم تجانس السمك والارتداد المرن من أبرز التحديات التي تواجه عملية السحب العميق، إذ يؤدي عدم إنتظام السمك إلى زيادة الإجهادات الموضعية وحدوث تشوهات قد تقلل من قدرة المنتج على التحمل، في حين يتسبب الارتداد المرن في تغييرات غير مرغوبة في أبعاد القطعة المشكّلة، مما قد يستدعي تعديل التصميم أو عمليات تصحيح إضافية، وبالتالي زيادة التكلفة الكلية للإنتاج. لذلك، أصبح التحكم الدقيق في معلمات العملية، ولاسيما سرعة الكبّاس[**punch speed SPD**]، أمرًا بالغ الأهمية لضمان جودة عالية وتقليل العادم الذي يزيد من تكلفة الإنتاج النهائي.

وقد تناولت العديد من الدراسات السابقة تأثير معلمات العملية المختلفة على أداء عملية السحب العميق بهدف تحسين جودة الأجزاء المعدنية الناتجة وتقليل العيوب. فقد استخدم **Yagami, T. and Manabe, K.I** في دراستهما نموذج العناصر المحدودة (**Finite Element Method FEM**) لمحاكاة عملية سحب شكل أسطواني لمادة حساسة لمعدّل الانفعال، مع تحكّم مزدوج في سرعة الكبّاس وقوة ماسك الصفيحة المراد تشكيلها. وُجد أن توزيع السمك وتحسين قابلية السحب يمكن أن يتحسّنا إذا بدأت العملية بسرعة منخفضة وقوة مسك منخفضة في المراحل المبكرة، ثم زادت تدريجيًا في المراحل التالية. وأشارت النتائج إلى أن هذا التدرّج يقلّل من تقلّص السمك في منطقة الكتف ويزيد من معدل الإنتاجية دون تقليل الجودة[1]. كما قام **Zhang** وآخرون بدراسة تأثير سرعة الكباس على عملية السحب العميق للألواح الألومنيوم باستخدام طريقة العناصر المحدودة، حيث أظهرت النتائج أن تقليل سرعة الكبّاس يسهم في تحسين توزيع السمك والحد من التشوهات مثل التجاعيد والتمزق، مما يُحسن من جودة المنتج النهائي[2]. وفي دراسة تجريبية وعدديه أوضح**Manable** وآخرون أن التغير التدريجي في سرعة الكبّاس وقوة ماسك الصفيحة على سبائك عند درجة حرارة 250 °**C** يمكن أن يحسن توزيع السمك ويقلل وقت المعالجة ويزيد من كفاءة العملية [3]. كذلك قام **Hedayati** وآخرون بدراسة تأثير سرعة الكبّاس على سلوك الصفائح المعدنية أثناء عملية السحب العميق باستخدام المحاكاة العددية ببرنامج **ABAQUS**، حيث أظهرت النتائج أن تقليل سرعة الكبّاس يؤدي إلى زيادة سمك الجزء النهائي عند نفس عمق السحب، مما يسهم في تحسين توزيع السمك والحد من التشوهات مثل التجاعيد والتمزق.[4] كما تناول **Mori** وآخرون تأثير تغير سرعة الكبّاس في عمليات السحب العميق متعددة المراحل لألواح الألومنيوم. حيث بيّنت النتائج أن سرعة الكبّاس تؤثر بشكل مباشر على قابلية التشكيل في السحب العميق متعدد المراحل لصفائح الألمنيوم، حيث إن اختيار سرعة مناسبة يسهم في تقليل التمزق والتجعد وتحسين توزيع السمك وجودة المنتج النهائي، مما يؤكد على أهمية التحكم الديناميكي في سرعة الكباس أثناء العملية[5]. كما أجري **Hussain G, Gao L, Hayat** بحث على سبائك الماغنيسيوم **AZ31** عند درجات حرارة مختلفة، وأظهرت نتائجه أن التحكم في سرعة الكبّاس ودرجة حرارة الصفيحة يُعد من العوامل الحاسمة في تحسين قابلية التشكيل العميق للسبائك الماغنيسيوم [6]. وتُركّز الدراسة التي أجراها **Li** وآخرون على تحسين عملية السحب العميق باستخدام محاكاة العناصر المحدودة (**FEM**) لتحديد تأثير سرعة الكبّاس وقوة ماسك الصفيحة على جودة المنتج النهائي [7]. ورغم أن هذه الدراسات قدّمت مساهمات علمية قيمة، إلا أن معظمها ركّز على تأثير سرعة الكبّاس بالاشتراك مع معلمات تشغيلة أخرى، مثل درجة التسخين، وقوة ماسك الصفيحة ومعامل الاحتكاك. في المقابل، لم يتم يدرس بشكل كافٍ تأثير التغيير التدريجي لسرعة الكبّاس بصورة منفردة مع تثبيت بقية معلمات العملية بهدف فهم تأثيره المستقل على سلوك المادة أثناء عملية السحب

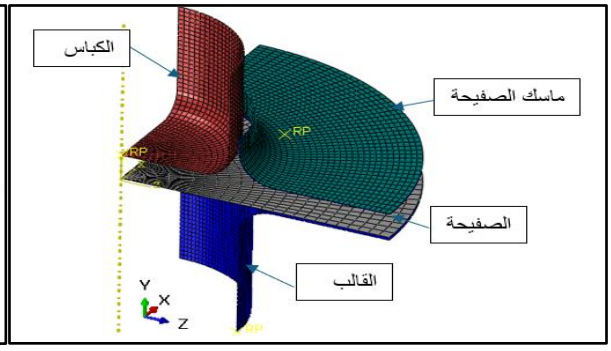
العميق. لذلك تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير التغير التدريجي في سرعة الكباس ومدى تأثيره على توزيع السمك ومقدار الإرتداد المرن بإستخدام المحاكاة العددية المعتمدة على طريقة العناصر المحدودة. وقد تم إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد لعملية السحب العميق باستخدام برنامج **ABAQUS** مع مراعاة الخصائص الميكانيكية للمادة ومعامل الاحتكاك وأبعاد القالب. ما تم مقارنة نتائج السرعة المتدرجة مع نتائج السرعة الثابتة للكباس بهدف تحديد نطاق السرعة الأمثل الذي يسهم في تحسين جودة المنتج النهائي وتقليل العيوب الناتجة عن عملية التشكيل.

2. منهجية الدراسة

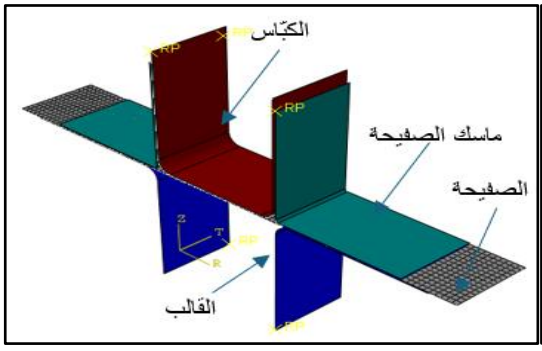
يُوضح هذا القسم الخطوات الأساسية المتبعة في بناء النموذج الهندسي وتحضيره لإجراء التحليل العددي باستخدام برنامج **ABAQUS/Explicit** . كما يتناول إعداد شبكة العناصر المحدودة، وتعريف الخصائص الميكانيكية للمادة، وتطبيق الشروط الحدية للعملية، إضافة إلى تنفيذ المحاكاة بإستخدام سرعة كبّاس متدرجة. وتهدف هذه المنهجية إلى توفير أساس علمي موثوق يمكن من خلاله تحديد السرعة المثلى للكبّاس التي تقلل من التشوهات وتُحسن من تجانس توزيع السمك في المنتج النهائي دون الحاجة إلى تجارب مكلفة أو طويلة المدى.

إعداد النموذج الهندسي

تم إنشاء النموذج الهندسي لعملية السحب العميق بإستخدام برنامج **ABAQUS**، حيث تم إعتماد نموذج على شكل كوب لدراسة ترقق الصفيحة المعدنية، ونموذج أخر على شكل حرف **U** لدراسة ظاهرة الإرتداد المرن. وقد تم تصميم النموذجين وفق أبعاد محددة مأخوذه من الدراسات السابقة [8,9] بما يماثل ظروف التشكيل الفعلية في التطبيقات الصناعية. يتكون النموذج من أربع مكونات رئيسية: القالب (**Die**)، والكبّاس (**Punch**)، والصفيحة المعدنية بسمك 1.1ملم (**Blank**) وماسك الصفيحة (**Blank holder**) كما هو موضح بالشكل (1-أ، ب). وقد روعي في تصميم النموذج الإلتزام بالأبعاد القياسية لنسبة العُمق الى نصف القطر (**L/D**) بهدف تجنب حدوث العيوب الشائعة أثناء عملية التشكيل، مثل التجاعيد أو التمزقات، وضمان إستقرار عملية السحب العميق. نظراً لتماثل الشكل الهندسي لعملية السحب العميق، تم إجراء التحليل العددي بإستخدام ربع النوذج بهدف تقليل الكلفة الحسابية وزمن المحاكاة [10].



شكل 1-أ. رسم تجميعي لنموذج الكوب

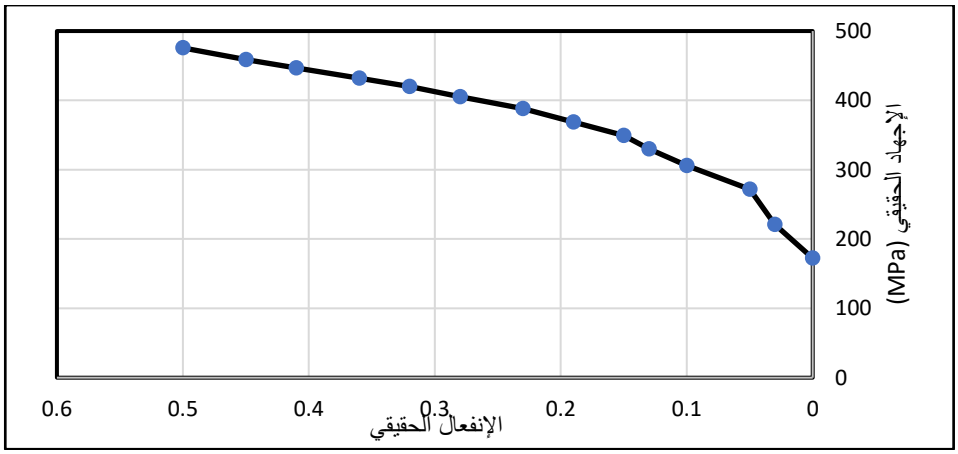


شكل 1-ب. رسم تجميعي لنموذج حرفU

لتمثيل عملية السحب العميق، تم إعتماد نموذج الجسم الصلب المنفصل (**Discrete Rigid Form**) لكل من الكبّاس والقالب وماسك الصفيحة، حيث يتم التحكم في حركة كل مكوّن بواسطة عقدة واحدة تُعرف باسم عقدة المرجع للجسم الصلب.(**Rigid Body Reference Node**). تم تجزئة القالب والكبّاس وماسك الصفيحة باستخدام عناصر من نوع**R3D4** ، بينما أعتُبرت المشغولة مادة قابلة للتشوه، وتم تمثيلها على شكل صفيحة مستوية (**planar shell**) بإستخدام عناصر القشرة (**Shell elements**) من نوع **S4R** ذات التكامل المنخفض [11]. يعتمد النموذج على خصائص الفولاذ الطري المستخدمة في المحاكاة، حيث يوضح الشكل رقم (2) منحنى الإجهاد والإنفعال الحقيقي لهذه المادة، وهو ما يتيح تمثيل السلوك المرن واللدن للصفيحة أثناء عملية السحب العميق بمحاكاة دقيقة بإستخدام برنامج **ABAQUS/Explicit**.

3. النتائج والمناقشة

يستعرض هذا القسم النتائج المستخلصة من المحاكاة المنفذة على دراسة تأثير تغير سرعة التشكيل على توزيع السمك والسلوك المرن للمنتج النهائي. تم تحليل البيانات الناتجة لتحديد العلاقة بين سرعة التشكيل وتباين السمك في مختلف مناطق المنتج، بالإضافة إلى تقييم مدى تأثير هذه السرعة على استجابة المنتج للإنفعال المرن بعد إكتمال العملية.

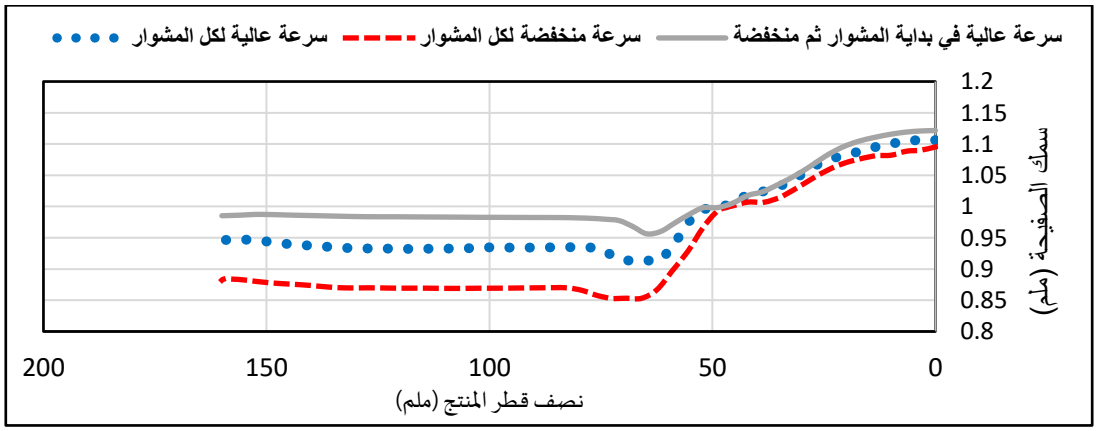


شكل 2. منحنى الإجهاد الحقيقي مقابل منحنى الانفعال الحقيقي البلاستيكي للفولاذ الطري [10].

1.3. تأثير تغير سرعة الكبّاس على الترقق

يوضّح الشكل (3) تأثير سرعة التشكيل على توزيع سماكة الصفيحة على طول نصف قطر المنتج في عملية السحب العميق تحت ثلاث حالات تشغيلية مختلفة للكبّاس. تمثل المنحنيات الثلاثة حالات التشغيل التالية: سرعة عالية ثابتة لكل المشوار(250ملم/ثانية)، سرعة منخفضة ثابتة(10ملم/ثانية)، وسرعة عالية في البداية ثم منخفضة لاحقا(250ملم/ثانية-10ملم/ثانية).

حيث تُظهر النتائج أن زيادة سرعة حركة الكباس تؤدي إلى تحسين انسياب المادة عبر منطقة السحب وتقليل الإحتكاك على سطح التلامس بين الصفيحة والقالب، مما ينتج عنه سُمك أكثر تجانسًا في هذه المناطق **[12]** في المقابل، تؤثر سرعة الكبّاس بشكل مباشر في معدل تدفق المادة داخل منطقة السحب، حيث ترتبط سرعة إنتقال المادة داخل القالب إرتباطا مباشرا بسرعة الكبّاس. فعند إستخدام سرعات منخفضة للكبّاس ينخفض معدل تدفق المادة نحو منطقة التشكيل، مما يؤدي الي زيادة تركّز الإجهادات في بعض المناطق، خاصة عند الحواف. وينتج عن هذا التركّز في الإجهادات حدوث ترقق موضعي في السمك نتيجة لزيادة التشوه اللدن في تلك المناطق. في المقابل، تسهم السرعات الأعلى للكّباس في تحسين إنسياب المادة داخل القالب وتوزيع التشوه بصورة أكثر تجانساً على جدار المنتج، مما يساعد على تقليل تركّز الإجهادات الموضعية وتحسين توزيع السمك مقارنة بحالة السرعة المنخفضة.

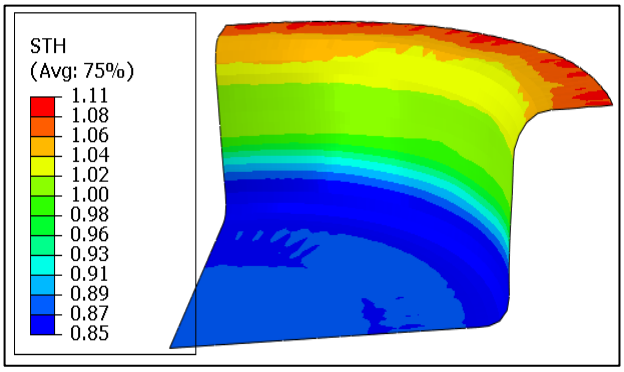


شكل 3. توزيع سماكة الصفيحة

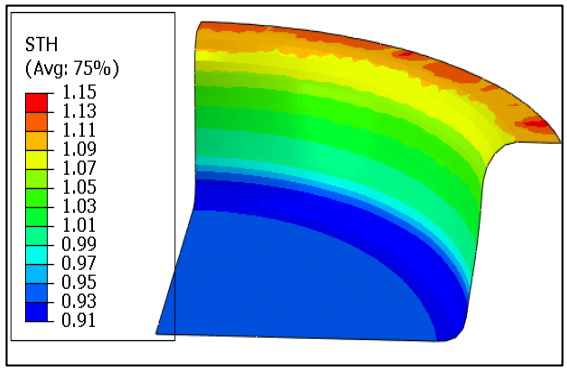
وهو ما يتفق مع دراسات سابقة حول حساسية السمك لحالة الانسياب في مراحل السحب الأولية**[13, 14]** ، كما يتضح أن الحالة التي تبدأ بسرعة كباس عالية ثم تنتقل إلى سرعة منخفضة حققت أفضل أداء مقارنةً بالحالات الأخرى. ويمكن تفسير ذلك بأن السرعة العالية في المراحل الأولى تسهم في تحسين انسياب المادة داخل القالب وتقليل زمن التشكيل، إذ تكون الصفيحة في هذه المرحلة ذات سمك أعلى وقابلية أكبر لتحمل التشوه. ومع تقدم عملية السحب، يؤدي التشوه اللدن المتراكم إلى حدوث تصلد انفعالي وزيادة مقاومة المادة للتشوه، بالتزامن مع تناقص السمك في المناطق الحرجة وظهور إجهادات متبقية

ناتجة عن عدم تجانس الانفعال. لذلك فإن تخفيض سرعة الكباس في المراحل النهائية يقلل من معدل الانفعال اللحظي، ويساعد على إعادة توزيع الإجهادات وتقليل تركّزها موضعيًا، مما يخفض احتمالية بدء التمزق ويحسن تجانس السمك وجودة المنتج النهائي[3].

توضّح الأشكال رقم (4-أ، ب، ج) الخرائط اللونية المستخلصة من المحاكاة العددية والمعبّرة عن توزيع السمك **(Sheet Thickness- STH)** عبر مناطق السحب المختلفة، حيث يُمكن ملاحظة التأثير المباشر لتدرّج سرعة الكبّاس على مواقع الترقق الموضعي للسمك. وتُبرز الخرائط أن التغيرات غير المتجانسة في السمك عند المناطق باللون الأزرق قد تسهم في زيادة احتمالية حدوث فشل مبكر أو تشقق المنتج أثناء التطبيق الصناعي. كما تؤكد هذه النتائج أهمية تطبيق استراتيجيات التحكم المرحلي في السرعة خلال مراحل السحب المختلفة لضمان تحسين جودة السمك وتقليل العيوب الناتجة عن الانسياب غير المنتظم للمادة.



ب. سرعة منخفضة ثابتة



أ. سرعة عالية ثابته

ج. سرعة متغيرة (عالية – منخفضة)

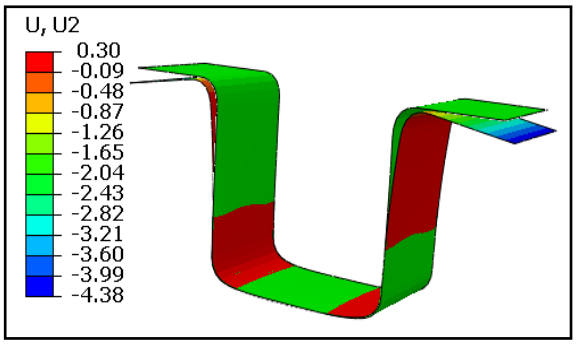
شكل 4. توزيع السمك بالسرعات المختلفة

2.3. تأثير تغير سرعة الكبّاس على الإرتداد المرن

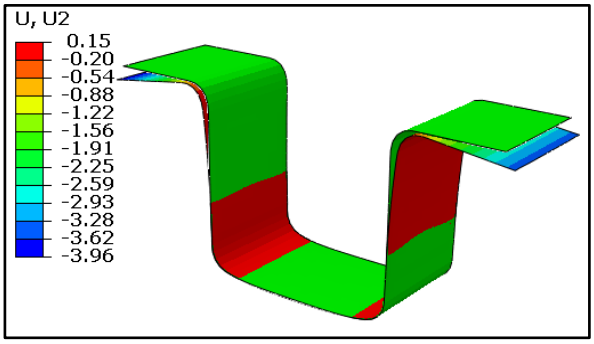
في عمليات تشكيل الصفائح المعدنية، يعتبر اختبار ثني الصفيحة على شكل حرف **U** من الطرق المعيارية المفضلة لهذا الغرض[9] . يرجع ذلك إلى أن الإختبار يولّد حالة انحناء واضحة ومتجانسة عبر الجدار، مما يسمح بقياس زاوية الارتداد أو التغير في الانحناء بعد إزالة الحمل بشكل دقيق.

شكل(5-أ) يمثل الخريطة اللونية لتوزيع الإرتداد المرن **(U2)** بعد رفع قوة التشكيل عند سرعة الكبّاس المنخفضة، حيث يبين الشكل إرتفاعاً واضحاً عند منطقتي الإنحناء الجانبي، مما يعكس تراكما أكبر للإجهادات المتبقية نتيجة لإنخفاض سرعة تدفق المادة.

كما يتبين وجود إنحراف أكبر في زاوية الإنحناء النهائية عن الزاوية التصميمية، وهو ما يؤكد حساسية المنتج لحالة السرعة المنخفضة في مراحل التشكيل الأولى. وتتطابق هذه النتائج مع منشورات سابقة أشارت الي أن السرعة المنخفضة تساهم في زيادة الإرتداد بعد إزالة الحمل[15] .



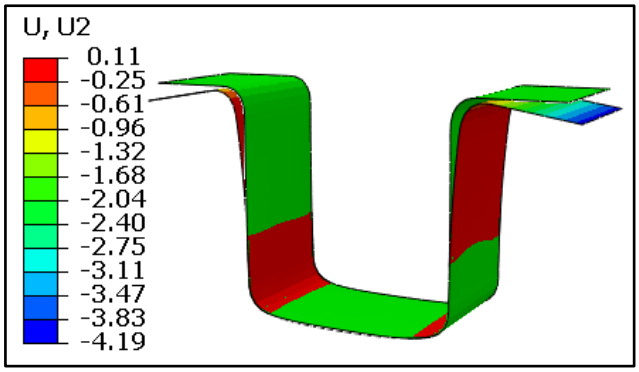
شكل 5-أ. الإرتداد المرن عند السرعة المنخفضة



شكل 5-ب. الإرتداد المرن عند السرعة العالية

الشكل (5-ب) يمثل خريطة توزيع الارتداد المرن عند السرعة العالية للكبّاس. يُلاحظ من هذه الخريطة اللونية إنخفاض ملحوظ في قيم الإزاحة المرنة في جميع مناطق الإنحناء، الى جانب تحسن واضح في انتظام الشكل الهندسي النهائي للقطعة ذات المقطع على شكل حرف **U** مقارنة بالحالة السابقة. ويُعزى هذا التحسن إلى تحسّن تدفق المادة أثناء عملية الإنحناء وتقليل التدرج في الإنفعال عبر سمك الصفيحة، الأمر الذي يؤدي إلى خفض مستوى الإجهادات المتبقية، وبالتالي الحد من ظاهرة الارتداد المرن. وتؤكد الدراسات السابقة أن زيادة سرعة التشكيل تُعد من أكثر العوامل فاعلية في التحكم بالتغيرات البعدية الناتجة عن الإرتداد المرن **[16]** .

ويظهر الشكل (5-ج) خريطة الإزاحة المرنة للحالة الثالثة بعد إزالة قوى التشكيل، مع مقارنتها بالشكل اثناء تسليط القوة، وذلك في إطار أسلوب التحكم المرحلي في سرعة الكبّاس.



شكل 5-ج. الإرتداد المرن عند السرعة العالية – المنخفض

يتضح من الشكل أن استراتيجية التغيير المرحلي لسرعة الكبّاس قد حققت توازنًا ملحوظًا في سلوك المادة أثناء عملية التشكيل. إذ تسهم السرعات العالية في المراحل الأولية في توليد حرارة تزيد من لدونة المادة، مما يحسن تدفقها وتقليل تركيز الإجهادات في حين توفر السرعات المنخفضة في المراحل النهائية تقلل الحرارة وتسمح بالتحكم الدقيق في الأبعاد والشكل الهندسي للمنتج النهائي.

وعلى الرغم من بقاء بعض الإرتداد المرن في زوايا الانحناء، إلا أن مستواه يظل معتدلًا ويتفوق على حالة السرعة المنخفضة فقط. وهو ما يتوافق مع نتائج منشورة تؤكد أفضلية التحكم التدريجي في السرعة للحصول على جودة أبعاد أعلى[17] .

تعكس الأشكال السابقة (5-أ، ب، ج) بوضوح أن الارتداد المرن يعتمد بشكل مباشر على نظام التحكم في سرعة الكبّاس، حيث كانت السرعة العالية الأكثر تأثيراً حيث كانت قيمة الإرتداد الأقل بين الحالات الثلاث، بينما جاءت الاستراتيجية المتغيرة كحل وسيط فعال، وهو ما يدعم التوجه لتطوير أنظمة تشكيل ذكية تعتمد على التحكم المرحلي في السرعة لتحسين دقة المنتجات المشكلة.

الاستنتاجات

أثبتت نتائج هذه الدراسة أن سرعة الكبّاس تؤثر تأثيرًا مباشرًا على جودة عملية السحب العميق. إذ تبين أن السرعات المنخفضة تحت ظروف هذه الدراسة تؤدي إلى زيادة ظاهرة الترقق وارتفاع قيم الارتداد المرن، في حين تسهم السرعات العالية في تحسين توزيع السمك والحد من التشوهات اللاحقة. كما أظهرت النتائج أن اعتماد استراتيجية التحكم المرحلي في سرعة الكبّاس، من خلال استخدام سرعة عالية في المراحل الأولية تليها سرعة منخفضة في المراحل النهائية، يحقق توازنًا فعالًا بين جودة التشكل ودقة الأبعاد النهائية للمنتوج.

وبناءً على ذلك، يمكن الاستنتاج أن التحكم في سرعة الكبّاس يُعد أحد العوامل الأساسية لتحسين أداء عمليات السحب العميق وتقليل العيوب التصنيعية، مما يسهم في رفع كفاءة العملية وتحسين جودة المنتجات الصناعية النهائية.

الخاتمة والتوصيات

1.5 الخاتمة:

خلص هذا البحث إلى دراسة تأثير تغير سرعة الكبّاس على جودة عملية السحب العميق مع التركيز على ظاهرتي الترقق (نموذج كوب) والارتداد المرن (نموذج حرف **U**) بإستخدام المحاكاة العددية ببرنامج . **ABAQUS** وقد أظهرت النتائج أن سرعة الكبّاس (في حالة ثبوت باقي معلمات العملية) تمثل عاملًا حاسمًا في التحكم بتدفق المادة وتوزيع الإجهادات والانفعالات أثناء التشكيل. بيّنت الدراسة أن السرعات المنخفضة تؤدي الى ضعف إنسياب المادة وزيادة الترقق عند الأطراف، بالإضافة إلى ارتفاع الإرتداد المرن نتيجة تراكم الإجهادات المتبقية. في المقابل، ساهمت السرعات العالية في تحسين توزيع السمك وتقليل الارتداد المرن مع تحقيق دقة أبعاد أفضل للمنتج النهائي. كما أظهرت استراتيجية التحكم المرحلي في السرعة (عالية ثم منخفضة) أداءً متوازنًا، حيث جمعت بين تحسين جودة التشكل وتقليل العيوب دون التأثير السلبي على استقرار العملية. وتؤكد هذه النتائج أهمية اعتماد استراتيجيات تحكم ديناميكية في سرعة الكبّاس كوسيلة فعالة لتحسين جودة المنتجات المسحوبة، خصوصًا للأشكال ذات الانحناءات المعقدة.

2.5 التوصيات:

استنادا الي نتائج هذا البحث، يمكن تقديم التوصيات التالية:

- . اعتماد التحكم المرحلي في سرعة الكبّاس كخيار تشغيلي مفضل لتقليل الترقق والارتداد المرن وتحسين الدقة الهندسية للمنتجات المسحوبة.
- . دمج التحكم في السرعة مع ضبط قوة ماسك الصفيحة ومعامل الاحتكاك لتحقيق أداء تشكيلي أكثر استقرارًا وجودة أعلى.
- . إجراء دراسات تجريبية مستقبلية للتحقق من نتائج المحاكاة العددية وربطها بالتصنيع الفعلي.
- . تطوير نماذج تحكم ذكية تعتمد على التحكم التكيفي في السرعة استنادًا إلى استجابة المادة أثناء التشكيل.

الشكر والتقدير

يقرّ المؤلف بأنه لم تُقدَّم أي مساهمات أو مساعدات تستوجب الإشارة إليها في قسم الشكر والتقدير، كما لم يتلقَّ هذا البحث أي تمويل من أي جهة عامة أو خاصة أو غير ربحية.

تضارب المصالح

يعلن المؤلف أن هذا البحث أُجري في غياب أي علاقات مالية أو تجارية أو شخصية يمكن أن تُفسَّر على أنها تمثل تضاربًا في المصالح . يعلن المؤلف أنه لا يوجد تضارب في المصالح.

مساهمات المؤلفين

المؤلف هو المسؤول عن جميع جوانب هذا العمل، بما في ذلك وضع التصور، وتصميم المنهجية، وجمع البيانات وتحليلها، وإجراء المحاكاة، وكتابة البحث ومراجعته، والموافقة على النشر.

التمويل

لم يتلق هذا البحث أي منحة محددة من أي وكالة تمويل في القطاعات العامة أو التجارية أو غير الربحية.

توفر البيانات

جميع البيانات التي تدعم نتائج هذه الدراسة متاحة ضمن هذه المخطوطة

المراجع

[1]. Yagami T, Manabe KI. FE analysis on deformation mechanism of strain-rate-sensitive materials in cylindrical deep-drawing with combination punch speed and blank holder control. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. 2007;1(12):1385-96.

[2]. Zhang SH, Nielsen KB, Danckert J, Kang DC, Lang LH. Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes. Journal of Materials Processing Technology. 2000 May 15;102(1-3):1-8. doi:10.1016/j.ijmecsci.2025.106641

[3]. Manabe KI, Soeda K, Shibata A. Effects of variable punch speed and blank holder force in warm superplastic deep drawing process. Metals. 2021 Mar 17;11(3):493.

[4]. Hedayati E, Hedayati A, Vahedi M, Faroughi S. Numerical investigation of the impact of punch speed on the deep drawing of square aluminum sheet using finite element method. Am J Eng Appl Sci. 2025;18(1):39–46.

[5]. Mori K, Abe Y, Suzuki M. Effect of punch speed on deformation behavior and formability in multi-stage deep drawing of aluminum alloy sheets. *Procedia Manuf.* 2020;50:115–121. doi:10.1016/j.promfg.2020.05.014

[6]. Hussain G, Gao L, Hayat N. Effect of punch speed and temperature on deep drawing of AZ31 magnesium alloy. Mater Manuf Process. 2023;38(7):713–723.

[7]. Li Y, Guo B, He X. Optimization of punch speed and blank holder force in deep drawing process using finite element simulation. J Mater Process Technol. 2022;305:117591.

[8]. Zein H, El Sherbiny M, Abd-Rabou M. Thinning and spring back prediction of sheet metal in the deep drawing process. Materials & Design. 2014;53:797–808.

[9]. J. Cao and J. Yuan, "Springback prediction in U-bend forming of advanced high-strength steels," Journal of Materials Processing Technology, vol. 211, pp. 1504–1512, 2011

[10]. Hajiahmadi S, Elyasi M, Shakeri M. Investigation of a new methodology for the prediction of drawing force in deep drawing process with respect to dimensionless analysis. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2019 Dec;14(1):14.

[11]. Abaqus Analysis Users Manual, vol. IV: Elements; 2011

[12]. Altan, T., Oh, S.I. and Gegel, H.L., 1983. Metal forming: fundamentals and applications.

[13]. Celik, I., Şensoy, A.T., Seven, G. and Cicek, D., 2025. Improving Deep Drawing Quality of DD13 Sheet Metal: Optimization of Process Parameters Using Box–Behnken Design. Materials, 18(7), p.1424.

[14]. Shamso, E., El Kafy, M.A. and Naeim, N., 2026. Numerical and statistical analysis of aluminum deep drawing using LS-DYNA coupled with Taguchi design and response surface methodology. Scientific Reports.

[15]. Chandrasekaran, P. and Manonmani, K., 2015, August. A review on springback effect in sheet metal forming process. In Int Conf Syst Sci Control Commun Eng Technol (Vol. 2015, pp. 43-49).

[16]. Lee, J.U., Hyun, Y.T., Lim, J.S., Kim, E.Y. and Won, J.W., 2025. Effect of bending speed on springback and thinning behavior of commercially pure titanium sheets under V-bending. Materials & Design, p.114231

[17]. Li, H., Chen, S.F., Zhang, S.H., Xu, Y. and Song, H.W., 2022. Deformation characteristics, formability and springback control of Titanium alloy sheet at room temperature: A review. Materials, 15(16), p.5586. doi.org/10.3390/ma15165586