

تصميم قبضة روبوتية تحاكي حركة فك الأفعى

فردوس الحاج⁽¹⁾، محمود بني المرجة⁽²⁾، نافع عفاش⁽³⁾

1 - طالبة ماجستير. 2- أستاذ، قسم هندسة التصميم الميكانيكي، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

3- باحث في مركز الدراسات والبحوث العلمية.

المخلص

تم تصميم وتنفيذ مقبض روبوت بالاستفادة من أسلوب العض والابتلاع في فك الأفعى. تتألف هذه القبضة من فكين: الفك العلوي وهو عبارة عن زوج من ميكانيزم رباعي المحاور (*4bar*) والفك السفلي عبارة عن قطعتين صُممتا بطريقة تسمح للفك بالتمدد الجانبي من أجل استيعاب الأحجام الكبيرة. يتم تحريك الفكين العلوي والسفلي بواسطة ميكانيزم ساعدي مرفقي لكل من الفكين، وتتم قيادة هذه القبضة ككل عن طريق ميكانيزم برغي _ صامولة. بعد ذلك تم دراسة النموذج الهندسي المباشر والعكسي للمقبض، وقمنا بتمثيل هذه العلاقات على برنامج الـ *MatLab*. ثم قمنا بدراسة القوى الستاتيكية للميكانيزم وتحديد العزم المطلوب للمحرك لإتمام عملية القبض. ثم تم التأكد من النتائج عن طريق إجراء المحاكاة الديناميكية للميكانيزم عن طريق برنامج الـ *Inventor*.

الكلمات المفتاحية: مقبض، ميكانيزم ساعدي مرفقي، محاكاة ديناميكية.

Design of Robot Gripper Using Simulation of Snake Jaw

Fardos AIHAJ ⁽¹⁾, Mahmoud BANI AI MARJEH ⁽²⁾, Nafee AFFASH ⁽³⁾

1-M-A Candidate; 2- Professor; Department of Mechanical Design Engineering; Faculty of Mechanical and Electrical Engineering; University of Damascus. 3- Researcher at the Scientific Studies and Research Center.

Abstract

Inspired by the bite and swallowing function of a snake's mouth, a robot end-effector grabbing mechanism was designed and implemented. This gripper consists of two jaws: the upper jaw consists of a double four-bar linkage mechanism and the lower jaw mechanism consists of two pieces designed to allow the jaw to extend laterally to accommodate the large sizes of the loads. The upper and lower jaws are moved by a slider-crank mechanism for each of the jaws. This gripper driven as a whole by a screw-bolt mechanism. The direct and invers a geometry of the gripper were studied. Where these relationships were represented on the *Matlab* program. Then we studied the static forces of the mechanism and determine the torque required for the motor to achieve the gripping process. Then the results were confirmed by performing the dynamic simulation of the mechanism on the *Inventor* program.

Key words: gripper, slider-crank mechanism, dynamic simulation.

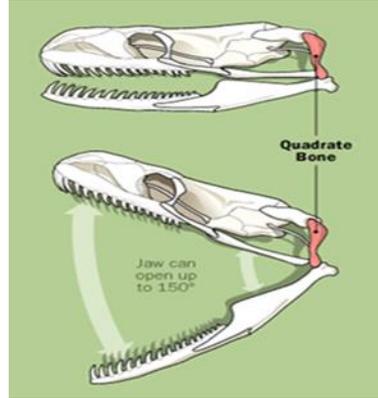
1- مقدمة:

تعتبر قبضات الروبوتات الصناعية من أهم المسائل الدراسية عند تصميم ودراسة الروبوتات. فهي مخصصة لحمل الأجسام على اختلاف أشكالها وأبعادها. حيث يجب أن تتمتع هذه القبضات بإمكانيات وظيفية معينة.

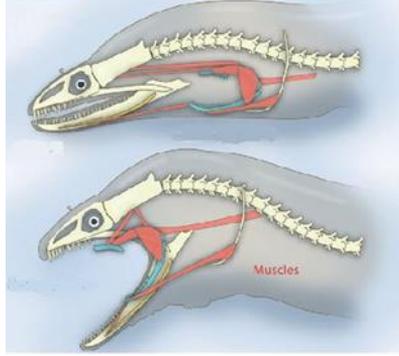
فالقبضات ونهايات الأذرع هي الأدوات التي يتفاعل بها الروبوت مع الوسط المحيط. وكلما كان تصميم هذه النهايات متقناً كلما زاد ارتفاع الروبوت في عمله، ولهذا أصبح تصميم هذه النهايات له أهمية كبيرة يوماً بعد يوم.

في هذه الورقة البحثية تم تصميم مقبض الروبوت اعتماداً على أسلوب العض والابتلاع في فك الأفعى، وذلك لما تتميز به الأفاعي من التصميم الفريد لهيكلها العظمي وخاصة الرأس الذي يُوفّر لها المرونة، والقدرة على الحركة، كما تتكيف الأفاعي لالتهام فريسة أكبر من حجمها بعدة مرّات؛ وذلك لأنها تحتوي على الكثير من المفاصل، كما أنّ كلّ فك يتكوّن من قطعتين غير مُلتحمتين من الأمام، وتكون عظام الفك متّصلةً بالجمجمة بشكل فضفاض بواسطة أربطة قابلة للتمدّد ممّا يسمح للأفعى بفتح فمها عمودياً وجانبياً، وهذا تكيفٌ مهمٌ يسمح للفكين بالتوسّع عندما تبتلع الأفعى فريسةً كبيرة [1-7]. بالإضافة إلى أن فم الأفعى يمكن أن يفتح بزاوية 150° ، لذلك فإن دراسة فك الأفعى له أهمية كبيرة في مجالات البحث العلمي، وبناءً على ذلك فإن دراسة تشريح الكائنات الحية وعلم حركتها هي الأساس النظري لدراسة ميكانيزم يحاكي حركة فك الأفعى [8-11].

الشكل 1: زاوية الفتح العظمي في فك الأفعى.



الشكل 2: الأربطة القابلة للتمدد التي تصل عظام الفك.



2- هدف البحث:

بما أن أهم المشاكل التي تواجهنا في القبضات الروبوتية هي:

- محدودية الوزن الممكن حمله.
 - محدودية الحجم الممكن التقاطه بواسطة هذه القبضات.
- لذلك كان الهدف من هذا المشروع هو تصميم وتنفيذ قبضة روبوتية صناعية تحقق المواصفات التالية:

- تحقيق أكبر حجم فضاء عمل ممكن (نسبياً تبعاً لحجم القبضة) بهدف الإمساك بأجسام ذات أشكال وحجوم كبيرة.
- مُقادة بالحد الأدنى من المفعلات.

3- الدراسة المرجعية:

حسب الدراسات المرجعية السابقة الخاصة بالتصميم الميكانيكي لفك مشابه لفك الأفعى فقد قام مجموعة من الباحثين:

(Zijuan Liu, Jian Fei, Zhuang Fu, Weixin Yan and Yanzheng Zhao (2011))،

بدراسة التصميم الميكانيكي لفك الأفعى [12]، حيث أن حركة القبضة تتم بواسطة 6 أسلاك فولاذية لكل جانب من جانبي الفك، ويقاد هذا الميكانيزم بواسطة 6 محركات لتأمين حركة الفكين العلوي والسفلي.

4- طرق وأدوات البحث النظرية:

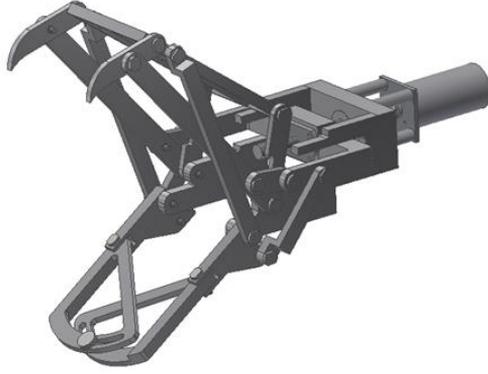
تم الاعتماد ضمن الدراسات اللاحقة على برنامج الـ *Inventor* بهدف التصميم الميكانيكي للقبضة ومحاكاتها الديناميكية، وكذلك على برنامج الـ *MatLab* لتمثيل العلاقات الهندسية للقبضة المدروسة.

4-1- التصميم الميكانيكي للميكانيزم المقترح:

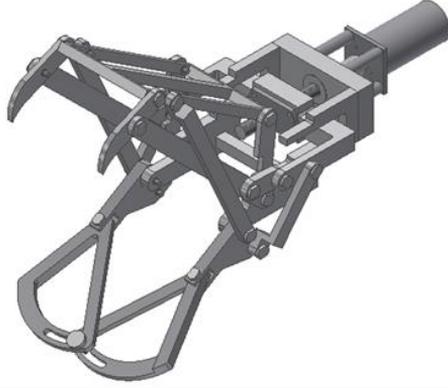
ضمن تصميمنا المقترح نسعى لإيجاد آلية لقيادة حركة الفك بواسطة محرك واحد فقط وبشكل يضمن تزامن الحركة للفكين العلوي والسفلي والناوب وتحقيق عملية القبض الصحيحة. حيث أن حركة فك الأفعى تنقسم إلى ثلاث حركات أساسية هي: الفتح - العض - الابتلاع.

بناءً على ذلك قمنا بتصميم القبضة الروبوتية على برنامج الـ *Inventor*، حيث تتألف هذه القبضة من فكين: الفك العلوي هو عبارة عن 4bar بما يضمن تزامن الحركة بين الناوب والفك العلوي، والفك السفلي عبارة عن قطعتين صُنعتا على شكل حرف L مع مجرى مفتوح بشكل قوس في الأمام وذلك لضمان أن الجزء الأيمن والأيسر للفك السفلي يتحركان حركة أفقية متناظرة لاستيعاب حجم الحمل، مع وجود خاصية الإرجاع النابضي بواسطة صفائح نابضية. يتميز الفك بقدرة الفتح بزواوية كبيرة بما يحاكي زاوية الفتح عند فك الأفعى. يتم تحريك الفكين العلوي والسفلي بواسطة ميكانيزم ساعدي مرفقي لكل منهما. وتتم قيادة هذه القبضة ككل عن طريق ميكانيزم برغي _ صامولة مُقاد بمحرك واحد. بذلك نكون قد حققنا تصميم مقبض روبوت يحاكي حركة فك الأفعى بمحرك وحيد.

الشكل 3: التصميم الميكانيكي للقبضة الروبوتية.



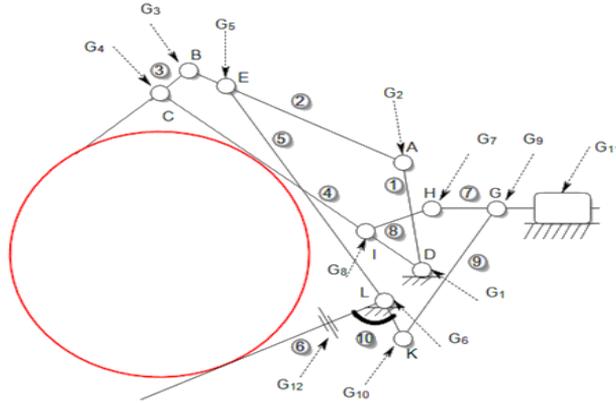
الشكل 4: القبضة الروبوتية في حالة التمدد الجانبي للفك السفلي.



4-2- المخطط الحركي لميكانيزم القبضة:

يبين الشكل التالي المخطط الحركي للميكانيزم والروابط التي يتألف منها.

الشكل 5: المخطط الحركي للميكانيزم.



نلاحظ من الشكل أن الأجسام ترتبط فيما بينها بالروابط التالية:

- G1: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (1) وجسم القبضة الثابت.
- G2: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (1) والقطعة (2).
- G3: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (2) والقطعة (3).
- G4: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (3) والقطعة (4).
- G5: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (5) والقطعة (2).
- G6: رابطة دورانية تربط بين القطعة (5) والقطعة (10) وكذلك مع جسم القبضة الثابت.
- G7: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (7) والقطعة (8).
- G8: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (8) والقطعة (4).
- G9: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (9) والقطعة (7).
- G10: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (10) والقطعة (9).
- G11: رابطة انسحابية بسيطة بين القطعة (7) وجسم القبضة الثابت.
- G12: رابطة دورانية بسيطة بين القطعة (10) والقطعة (6).

4-3- النمدجة الهندسية:

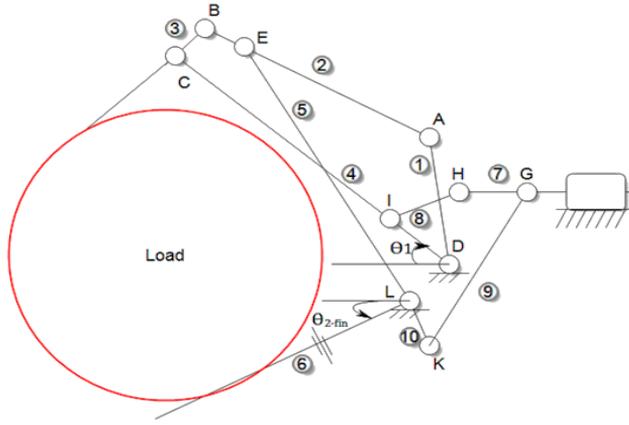
4-3-1- النموذج الهندسي المباشر:

يعرف النموذج الهندسي المباشر بأنه مجموعة العلاقات الرياضية التي تربط بين دخل النظام وهو قيمة المفعل الانسحابي x والخرج الذي هو قيمة زاوية الفتح للفكين العلوي والسفلي θ ونعبر عنه بالعلاقة التالية: $\theta = f(x)$.

نميز هنا بين نموذجين هندسيين للقبضة، الأول لنمذجة الفك العلوي والآخر للفك السفلي، حيث نعرف θ_1 زاوية الفك العلوي وكذلك θ_{2-fin} زاوية الفك السفلي وبالتالي يكون:

$$\theta = \theta_1 + \theta_{2-fin}$$

الشكل 6: زاويتا الفكين العلوي والسفلي.



❖ النموذج الهندسي المباشر للفك العلوي:

يحوي الميكانيزم الساعدي المرفقي القائد للفك العلوي (D,I,H,G) على مجالي عمل:

➤ الأول: عندما تكون النقطة D تقع قبل النقطة H .

➤ الثاني: عندما تكون النقطة H تقع قبل النقطة D.

حيث من أجل كل مجال عمل لدينا علاقة رياضية تُوصف النموذج، والحالة المشتركة تكون عندما تقع H و D على استقامة واحدة. وبالتالي يمكن تقسيم مجال العمل إلى جزأين:

1. مجال العمل الأول عندما تكون $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$.

2. مجال العمل الثاني عندما تكون $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$.

حيث قيمة الزاوية 24.5° تكافئ الزاوية التي توافق الحالة المشتركة عندما تكون النقطتان H و D على استقامة واحدة (حيث تم تحديد قيمة هذه الزاوية بالاعتماد على أبعاد التصميم الميكانيكي المقترح للميكانيزم).

يمكن استنتاج علاقة الحالة الأولى للفك العلوي عندما تكون الزاوية $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$ من الشكل 7 كما يلي:

نطبق نظرية فيثاغورث على الشكل 7 فنتنتج العلاقة التالية:

$$L_2^2 = (L_1 \cos \theta_1 - X)^2 + (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2$$

نقوم بفك تربيع الأقواس:

$$L_2^2 = L_1^2 \cos^2 \theta_1 - 2L_1 X \cos \theta_1 + X^2 + L_3^2 - 2L_1 L_3 \sin \theta_1 + L_1^2 \sin^2 \theta_1$$

نضع بدلاً عن $\sin^2 \theta_1$ الصيغة $(1 - \cos^2 \theta_1)$:

$$L_2^2 = L_1^2 \cos^2 \theta_1 - 2L_1 X \cos \theta_1 + X^2 + L_3^2 - 2L_1 L_3 \sin \theta_1 + L_1^2 (1 - \cos^2 \theta_1)$$

نحذف الحدود المتعاكسة بالإشارات:

$$L_2^2 = -2L_1 X \cos \theta_1 + X^2 + L_3^2 - 2L_1 L_3 \sin \theta_1 + L_1^2$$

نعزل الحدود التي فيها الزاوية θ_1 :

$$2L_1 X \cos \theta_1 + 2L_1 L_3 \sin \theta_1 = L_3^2 + L_1^2 + X^2 - L_2^2$$

نقسم طرفي المعادلة على المقدار $2L_1 X$ فنتنتج المعادلة التالية:

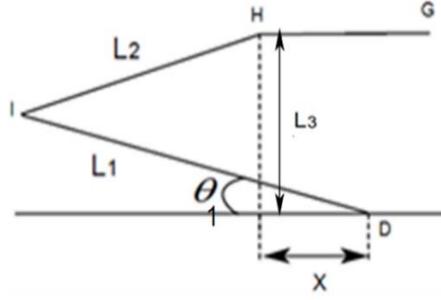
$$\cos \theta_1 + \frac{L_3}{X} \sin \theta_1 = \frac{L_3^2 + L_1^2 + X^2 - L_2^2}{2L_1 X}$$

نقوم بحل المعادلة فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{\frac{L_3^2 + L_1^2 + X^2 - L_2^2}{2L_1 X}}{\sqrt{(1)^2 + \left(\frac{L_3}{X}\right)^2}} - \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{(1)^2 + \left(\frac{L_3}{X}\right)^2}}$$

حيث L_1, L_2, L_3 هي اطوال الميكانيزم الساعدي المرفقي الخاص بالفك العلوي.

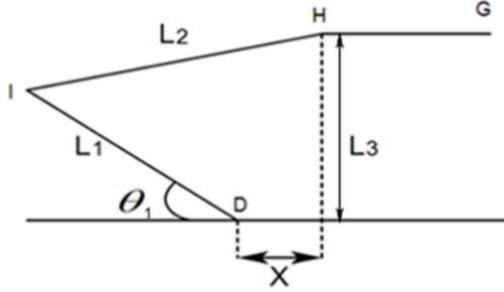
الشكل 7: المخطط الحركي للفك العلوي عندما $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$.



بنفس الطريقة السابقة نستطيع استنتاج علاقة الحالة الثانية للفك العلوي وذلك عندما تكون الزاوية $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$ فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{\frac{L_3^2 + L_1^2 + X^2 - L_2^2}{-2L_1X}}{\sqrt{(1)^2 + \left(-\frac{L_3}{X}\right)^2}} - \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{(1)^2 + \left(-\frac{L_3}{X}\right)^2}}$$

الشكل 8: المخطط الحركي للفك العلوي عندما $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$.



❖ النموذج الهندسي المباشر للفك السفلي:

يحوي الميكانيزم الساعدي المرفقي القائد للفك السفلي (L,K,G) على مجال عمل: $\theta_{2-fin} \in [0^\circ, 50^\circ]$ والتي تكافئ $\theta_2 \in [45^\circ, 95^\circ]$ ، حيث تم اعتماد الزاوية θ_2 وذلك لتبسيط نمذجة العلاقات الرياضية وتُعرف حسب العلاقة التالية (الشكل 9):

$$\theta_{2-fin} = \pi - \theta_0 - \theta_2$$

حيث أن: $\theta_0 = 85^\circ$ (هذه القيمة تؤخذ من التصميم الميكانيكي المقترح) وبالتالي تصبح العلاقة:

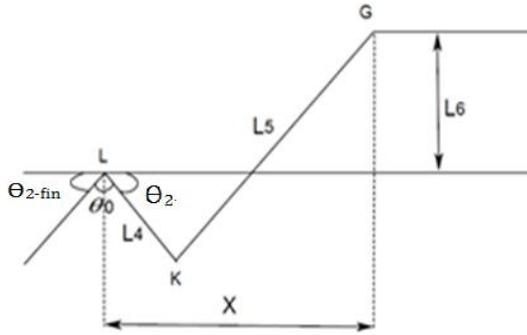
$$\theta_{2-fin} = 95^\circ - \theta_2$$

بنفس الطريقة السابقة أيضاً نستطيع استنتاج علاقة النموذج الهندسي المباشر للفك السفلي وبالتالي نكتب العلاقة بالشكل التالي:

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{L_6^2 + L_4^2 + X^2 - L_5^2}{2L_4X} - \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{(1)^2 + \left(-\frac{L_4}{X}\right)^2}}$$

حيث L_4, L_5, L_6 هي اطوال الميكانيزم الساعدي المرفقي الخاص بالفك السفلي.

الشكل 9: المخطط الحركي للفك السفلي عندما $\theta_2 \in [45^\circ, 95^\circ]$.



4-3-2- النموذج الهندسي العكسي:

يعرف النموذج الهندسي العكسي بالعلاقة: $x=f(\theta)$

❖ النموذج الهندسي العكسي للفك العلوي:

نستنتج علاقة النموذج الهندسي العكسي للحالة الأولى للفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$ كما يلي:

نطبق نظرية فيثاغورث على الشكل 7 فنتتج العلاقة التالية:

$$L_2^2 = (L_1 \cos \theta_1 - X)^2 + (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2$$

$$(L_1 \cos \theta_1 - X)^2 = L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2$$

للتخلص من التربيع نقوم بجذر الطرفين:

$$L_1 \cos \theta_1 - X = \pm \sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}$$

نختار الحل الموجب فنتتج لدينا العلاقة:

$$X = L_1 \cos \theta_1 - \sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}$$

بنفس الطريقة السابقة نستطيع استنتاج علاقة النموذج الهندسي العكسي للحالة الثانية لفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$ والتي نُكتب بالشكل التالي:

$$X = \sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2} - L_1 \cos \theta_1$$

❖ النموذج الهندسي العكسي للفك السفلي:

باستخدام طريقة الاستنتاج السابقة أيضاً نستطيع استنتاج علاقة النموذج الهندسي للفك السفلي عندما تكون الزاوية $\theta_{2-fin} \in [0^\circ, 50^\circ]$ والتي تكافئ $\theta_2 \in [45^\circ, 95^\circ]$ فتكون العلاقة:

$$X = L_4 \cos \theta_2 + \sqrt{L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2}$$

وبذلك نكون قد أوجدنا العلاقات الرياضية الحاكمة للنموذجين المباشر والعكسي للقبضة الروبوتية المقترحة.

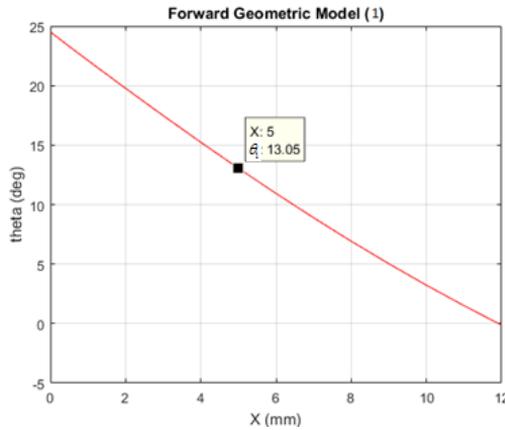
4-4- تمثيل علاقات النموذج الهندسي المباشر والعكسي على برنامج Matlab والتأكد من صحة العلاقات على برنامج Inventor:

تم تمثيل العلاقات الرياضية السابقة باستخدام برنامج *MatLab* وتم الوصول إلى مجموعة المنحنيات الممثلة لها (كما ستوضح الفقرات اللاحقة). وللتحقق من صحة العلاقات المدروسة تم أخذ نقطة عشوائية من كل منحنى وتم التأكد من مطابقتها للقيم العملية على برنامج *Inventor*.

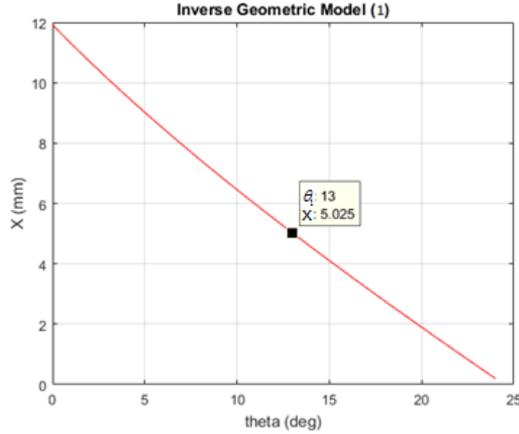
4-4-1- التمثيل البياني للنموذج الهندسي المباشر والعكسي للحالة الأولى للفتك العلوي:

بتمثيل العلاقات الرياضية الحاكمة للنموذجين المباشر والعكسي للحالة الأولى للفتك العلوي نحصل على الشكلين التاليين:

الشكل 10: المخطط البياني للنموذج الهندسي المباشر للحالة الأولى للفتك العلوي .



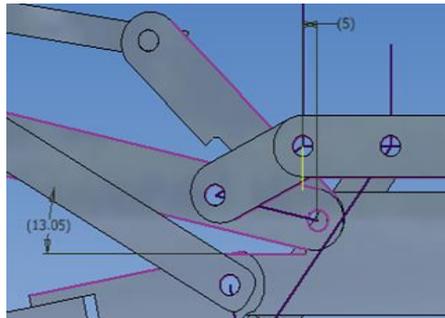
الشكل 11: المخطط البياني للنموذج الهندسي العكسي للحالة الأولى للفتك العلوي.



من الشكلين السابقين نلاحظ وحدانية الحل لكل من النموذجين المباشر والعكسي على كامل مجال العمل، فمن أجل دخل معين نحصل على خرج مقابل وحيد، حيث من أجل نقطة عمل معينة ولتكن $(x=5\text{mm}, \theta=13\text{deg})$ نلاحظ تطابق الحل بين النموذجين المباشر والعكسي للقبضة.

نقوم كذلك بالتحقق عملياً من صحة نقطة العمل السابقة من خلال برنامج الـ *Inventor*، حيث نلاحظ تطابق النتائج العملية مع القيم النظرية للنموذج الممثلة على المخطط البياني ($\theta_{act}=13.05 \text{ deg}$ ، $x_{act}=5 \text{ mm}$).

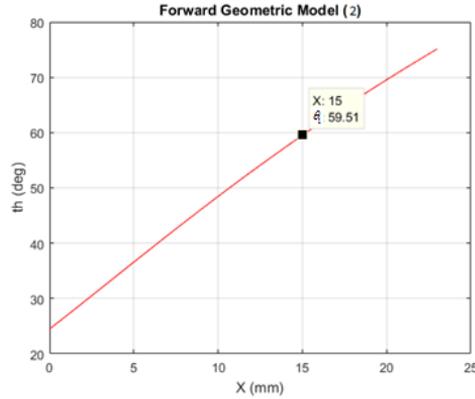
الشكل 12: التحقق العملي للحالة الأولى للفك العلوي على برنامج inventor.



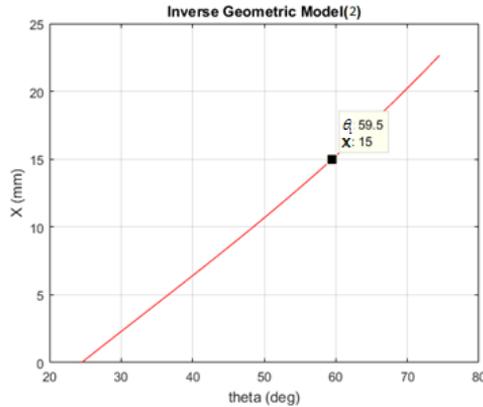
4-4-2- التمثيل البياني للنموذج الهندسي المباشر والعكسي للحالة الثانية للفتك العلوي:

تقوم كذلك بتمثيل العلاقات الرياضية الحاكمة للنموذجين المباشر والعكسي للحالة الثانية للفتك العلوي فنحصل على الشكلين التاليين:

الشكل 13: المخطط البياني للنموذج الهندسي المباشر للحالة الثانية للفتك العلوي.



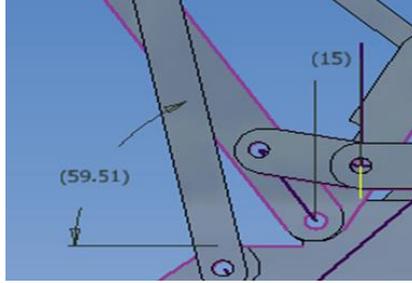
الشكل 14: المخطط البياني للنموذج الهندسي العكسي للحالة الثانية للفتك العلوي.



كما في الحالة السابقة، نلاحظ هنا وحدانية الحل لكل من النموذجين المباشر والعكسي على كامل مجال العمل، حيث من أجل نقطة عمل معينة ولتكن $(\theta = 59.5 \text{ deg}, x = 15 \text{ mm})$ نلاحظ تطابق الحل بين النموذجين المباشر والعكسي للقبضة.

كما نلاحظ تطابق النتائج العملية مع القيم النظرية للنموذج ($x_{act}=15mm$ ، $(\theta_{act}=59.51deg)$.

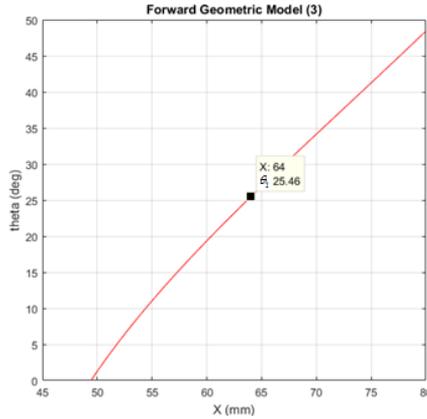
الشكل 15: التحقق العملي للحالة الثانية للفك العلوي على برنامج inventor.



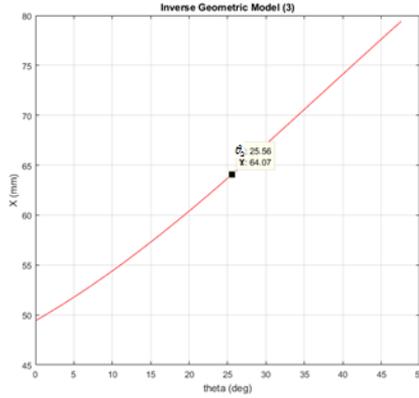
4-4-3- التمثيل البياني للنموذج الهندسي المباشر والعكسي للفك السفلي:

نقوم كذلك بتمثيل العلاقات الرياضية الحاكمة للنموذجين المباشر والعكسي للفك السفلي فينتج الشكلين التاليين:

الشكل 16: المخطط البياني للنموذج الهندسي المباشر للفك السفلي.

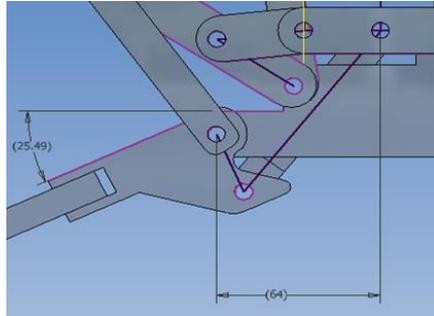


الشكل 17: المخطط البياني للنموذج الهندسي العكسي للفك السفلي.



من الشكلين السابقين نلاحظ هنا كذلك وحدانية الحل لكل من النموذجين المباشر والعكسي للفك السفلي على كامل مجال العمل، فمن أجل دخل معين نحصل على خرج مقابل وحيد، حيث من أجل نقطة عمل معينة ولتكن $(\theta_{2-fin}=25.5deg, x=64mm)$ نلاحظ تطابق الحل بين النموذجين المباشر والعكسي للقبضة. نقوم كذلك هنا بالتحقق عملياً من صحة نقطة العمل السابقة من خلال برنامج الـ *Inventor*، حيث نلاحظ تطابق النتائج العملية مع القيم النظرية للنموذج الممثلة على المخطط البياني $(\theta_{act}=25.49deg, x_{act}=64mm)$.

الشكل 18: التحقق العملي لحالة الفك السفلي على برنامج inventor.



مما سبق نستنتج تطابق القيم النظرية مع القيم العملية في كل من النموذجين الهندسي المباشر والعكسي لكل حالة من الحالات الثلاثة الموصفة لفناء عمل القبضة.

4-5 - النموذج الحركي للميكانيزم:

هو مجموعة العلاقات التي تربط سرعة دخل الميكانيزم X بالسرعة الزاوية ω للفكين. يعطى النموذج الحركي بالعلاقة التالية:

$$x' = \frac{dx}{dt}$$

$$x' = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$

$$x' = \frac{dx}{d\theta} \cdot \omega$$

$$x' = v(\theta) \cdot \omega$$

لكل حالة من الحالات الثلاثة السابقة لدينا علاقة رياضية حاكمة للنموذج الحركي. لإيجاد علاقة النموذج الحركي للحالة الأولى للفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$ ، نقوم أولاً بإيجاد $v(\theta)$ عن طريق اشتقاق العلاقة:

$$X = L_1 \cos \theta_1 - \sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}$$

وبالتالي فإن علاقة السرعة للحالة الأولى هي:

$$v(\theta) = -L_1 \sin \theta_1 - \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}}$$

نعوض علاقة السرعة $v(\theta)$ في علاقة النموذج الحركي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x' = \left[-L_1 \sin \theta_1 - \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}} \right] \cdot \omega$$

بنفس الطريقة السابقة نستطيع إيجاد علاقة النموذج الحركي للحالة الثانية للفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$:

حيث نجد بالاشتقاق الرياضي أن علاقة السرعة للحالة الثانية للفك العلوي هي:

$$v(\theta) = L_1 \sin \theta_1 + \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}}$$

نعوض علاقة السرعة في علاقة النموذج الحركي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x' = \left[L_1 \sin \theta_1 + \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}} \right] \cdot \omega$$

بنفس الطريقة السابقة أيضاً نستطيع إيجاد علاقة النموذج الحركي للفك السفلي:
حيث أن علاقة السرعة للفك السفلي تُكتب بالشكل التالي:

$$v(\theta) = -L_4 \sin \theta_2 + \frac{-(L_6 + L_4 \sin \theta_2)(L_4 \cos \theta_2)}{\sqrt{L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2}}$$

نعوض علاقة السرعة في علاقة النموذج الحركي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x' = \left[-L_4 \sin \theta_2 + \frac{-(L_6 + L_4 \sin \theta_2)(L_4 \cos \theta_2)}{\sqrt{L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2}} \right] \cdot \omega$$

4-6- النموذج التحريكي للميكانيزم:

هو مجموعة العلاقات التي تربط تسارع دخل الميكانيزم بالتسارع الزاوي للفكين.
يعطى النموذج التحريكي بالعلاقة التالية:

$$x'' = a(\theta) \cdot \omega^2 + v(\theta) \cdot \dot{\omega}$$

لإيجاد علاقة النموذج التحريكي للحالة الأولى للفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [0^\circ, 24.5^\circ]$
نوجد علاقة التسارع عن طريق اشتقاق علاقة السرعة.

بعد اشتقاق علاقة السرعة للحالة الأولى للفك العلوي تصبح علاقة التسارع بالشكل التالي:

$$a(\theta) = -L_1 \cos \theta_1 - \left[\frac{A - B + C}{\left[L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

حيث أن:

$$A = \left[L_1^2 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1) - L_1 L_3 \sin \theta_1 \right] \cdot (L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2)$$

$$B = L_1^2 L_3^2 \cos^2 \theta_1$$

$$C = L_1^4 \sin^2 \theta_1 \cdot \cos^2 \theta_1$$

نعوض علاقة التسارع للحالة الأولى للفك العلوي في علاقة النموذج التحريكي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x'' = \left[-L_1 \cos \theta_1 - \frac{A - B + C}{\left[L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot \omega^2 - \left[L_1 \sin \theta_1 - \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}} \right] \cdot \dot{\omega}$$

بنفس الطريقة السابقة نستطيع إيجاد علاقة النموذج التحريكي للحالة الثانية للفك العلوي عندما تكون $\theta_1 \in [24.5^\circ, 75^\circ]$:

حيث أن علاقة التسارع للحالة الثانية للفك العلوي هي:

$$a(\theta) = L_1 \cos \theta_1 + \frac{A - B + C}{\left[L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

حيث أن:

$$A = \left[L_1^2 (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1) - L_1 L_3 \sin \theta_1 \right] \cdot (L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2)$$

$$B = L_1^2 L_3 \cos^2 \theta_1$$

$$C = L_1^4 \sin^2 \theta_1 \cdot \cos^2 \theta_1$$

نعوض علاقة التسارع للحالة الثانية للفك العلوي في علاقة النموذج التحريكي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x'' = \left[L_1 \cos \theta_1 + \frac{A - B + C}{\left[L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot \omega^2 + \left[L_1 \sin \theta_1 + \frac{(L_3 - L_1 \sin \theta_1)(L_1 \cos \theta_1)}{\sqrt{L_2^2 - (L_3 - L_1 \sin \theta_1)^2}} \right] \cdot \dot{\omega}$$

وعلاقة التسارع للفك السفلي تكتب بالشكل التالي:

$$a(\theta) = -L_4 \cos \theta_2 + \frac{A - B - C - D}{\left[L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

حيث أن:

$$A = \left[L_4^2 (\sin^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2) + L_4 L_6 \sin \theta_2 \right] \cdot \left(L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2 \right)$$

$$B = L_4^2 L_6^2 \cos^2 \theta_2$$

$$C = 2L_4^3 L_6 \sin \theta_2 \cdot \cos^2 \theta_2$$

$$D = L_4^4 \sin^2 \theta_2 \cdot \cos^2 \theta_2$$

نعوض هذه العلاقة في علاقة النموذج التحريكي فتصبح العلاقة بالشكل التالي:

$$x'' = \left[-L_4 \cos \theta_2 + \left(\frac{A - B - C - D}{\left[L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \right] \cdot \omega^2 - \left[L_4 \sin \theta_2 + \frac{-(L_6 + L_4 \sin \theta_2)(L_4 \cos \theta_2)}{\sqrt{L_5^2 - (L_6 + L_4 \sin \theta_2)^2}} \right] \cdot \dot{\omega}$$

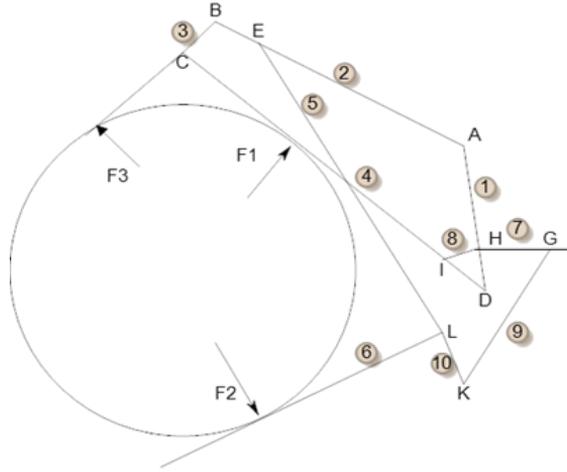
وبذلك نكون قد وصفنا نموذجي القبضة الحركي والتحريكي من خلال مجموعة العلاقات الرياضية السابقة.

4-7 - دراسة القوى الستاتيكية للميكانيزم:

نهدف خلال هذه الدراسة إلى تحديد قيمة عزم المحرك اللازم لقيادة القبضة وتحقيق عملية إمساك الحمل المفروض، حيث سيتم بدايةً حساب قيمة العزوم اللازم تطبيقها من قبل الفكين العلوي والسفلي على الحمل، ومن ثم يتم استنتاج قيمة القوة الانسحابية اللازم تطبيقها عن طريق الميكانيزم الساعدي المرفقي لكل من الفكين، وبالتالي يتم بالنهاية تحديد قيمة عزم المحرك المطلوب.

تم تقسيم أجزاء الميكانيزم إلى مجموعة وصلات لدراسة تأثير القوى فيما بينها. نفرض أن الحمل يؤثر على الفك العلوي والسفلي والناوب بثلاثة قوى متساوية القيمة هي F_1, F_2, F_3 على التوالي. تتم الدراسة بفرض أن الوزن المطلوب التقاطه وحمله هو 15 kg.

الشكل 19: تأثير قوى الحمل على القبضة الروبوتية.



لإيجاد قيمة مجموعة القوى انطلاقاً من الحمل يلزم معرفة معامل الاحتكاك بين مادة الحمل ومادة القبضة.

تم اعتماد مادة القبضة من *Aluminum* ونفرض أن الحمل مادته *Steel* وهي الحالة الأسوأ، وبالتالي نختار معامل الاحتكاك السكوني بين *Steel* و *Aluminum* من الجدول التالي:

الجدول 1: جدول معاملات الاحتكاك السكوني والحركي.

Material 1	Material 2	Coefficient Of Friction			
		DRY		Greasy	
		Static	Sliding	Static	Sliding
Aluminum	Aluminum	1.05-1.35	1.4	0.3	
Aluminum	Mild Steel	0.61	0.47		
Brake Material	Cast Iron	0.4			
Brake Material	Cast Iron (Wet)	0.2			
Brass	Cast Iron		0.3		
Brick	Wood	0.6			
Bronze	Cast Iron		0.22		
Bronze	Steel			0.16	
Cadmium	Cadmium	0.5		0.05	
Cadmium	Mild Steel		0.46		

بدايةً نحسب قوى الحمل المؤثرة على الميكانيزم:

$$F_{f_1} = \mu_s F_1$$

$$F_1 = \frac{F_{f_1}}{\mu} = \frac{50}{0.61} = 82N$$

$$F_{f2} = \mu_s F_2$$

$$F_2 = \frac{F_{f2}}{\mu} = \frac{50}{0.61} = 82N$$

$$F_{f3} = \mu_s F_3$$

$$F_3 = \frac{F_{f3}}{\mu} = \frac{50}{0.61} = 82N$$

حيث:

F_f : هي قوة الاحتكاك السكوني، μ_s : معامل احتكاك مادة الجسم مع مادة القبضة،

F : القوة الناظرية المطبقة على الجسم.

بعد ذلك عن طريق حساب القوى لكل وصلة من الميكانيزم وبالإستفادة من مثلثات القوى نستطيع إيجاد القوة اللازمة لإتمام عملية القبض والتي تساوي:

$$F = 957N$$

4-7-1 - تحديد مواصفات المفعل الانسحابي:

لتحديد عزم المحرك اللازم لإتمام عملية القبض نطبق المبدأ الأساسي في التحريك:

$$T_M = T_L + \dot{\omega} \sum I$$

حيث: T_M العزم الذي يقدمه المحرك، $\sum I$ مجموع عزوم العطالة، $\dot{\omega}$ التسارع الزاوي، T_L عزم تحريك الحمل.

يعطى عزم تحريك الحمل بالعلاقة التالية:

$$T_L = \frac{P(F + mg \cdot \sin \alpha)}{2\pi\eta}$$

حيث: P هي خطوة المحور المقلوظ، F القوة اللازمة لتحريك ميكانيزم القبضة، m كتلة الميكانيزم، g تسارع الجاذبية الأرضية، α زاوية توجيه الميكانيزم، η مردود المحور المقلوظ.

بتعويض القيم العددية المعتمدة تصميمياً ($p=2 \text{ mm}$ ، $\alpha=90^\circ$) نجد أن قيمة العزم هي:

$$T_L = \frac{2(957 + 2.5 * 10 * 1)}{2\pi * 0.9} = 347.5N.mm \approx 0.35N.m$$

نقوم بحساب مجموع عزوم العطالة $\sum I$ والذي يعطى بالعلاقة التالية:

$$\sum I = I_L + I_S$$

حيث أن:

$$I_L = M * \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2$$

$$I_S = M_S * \left(\frac{D_S}{2} \right)^2$$

حيث: I_L عزم العطالة للحمل، I_S عزم العطالة للمحور المقلوظ، P هي خطوة المحور المقلوظ، M كتلة الحمل الكلي، M_S كتلة المحور المقلوظ، D_S قطر المحور المقلوظ. نعوض القيم العددية في العلاقات السابقة:

$$I_L = M * \left(\frac{P}{2\pi} \right)^2$$

$$I_L = 15 * \left(\frac{2 * 10^{-3}}{2\pi} \right)^2 = 10 * 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

$$I_S = M_S * \left(\frac{D_S}{2} \right)^2$$

$$I_S = 0.147 * \left(\frac{14 * 10^{-3}}{2} \right)^2 = 49 * 10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

ومنه نجد أن مجموع عزوم العطالة يساوي:

$$\sum I = 59 * 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

ولحساب السرعة الزاوية والتسارع الزاوي نفرض أن الزمن اللازم لإتمام عملية القبض هو $t = 1s$ خلال شوط حركة قدره $d=36\text{mm}$ (وذلك حسب التصميم الميكانيكي).

ومنه فإن السرعة الخطية هي:

$$V = \frac{d}{t} = \frac{36}{1} = 36 \text{ mm / s}$$

والسرعة الزاوية:

$$W = \frac{V}{p} = \frac{36}{2} = 18 \text{ tr / s} = 113 \text{ rad / s} = 1080 \text{ rpm}$$

نفرض أننا نريد الوصول لهذه السرعة الزاوية من لحظة الإقلاع بزمن قدره 0.1 s

$$\omega = \frac{1080 * 2\pi}{60 * 0.1} = 1130.4 \text{ rad} / \text{s}^2$$

وبالتالي:

$$\omega \sum I = 6.7 * 10^{-2} N . m$$

وبالتالي نجد أن عزم المحرك الذي نحتاجه هو:

$$T_M = 0.35 + 6.7 * 10^{-2} = 0.4 N . m$$

وبالتالي سيتم اختيار المحرك المطلوب وفق المواصفات المذكورة أعلاه.

5- النتائج ومناقشتها:

5-1- المحاكاة الديناميكية للقبضة الروبوتية:

قمنا بإجراء المحاكاة الديناميكية للقبضة المدروسة على برنامج الـ *Inventor* للتأكد من صحة النتائج النظرية.

حيث قمنا بدراسة الوضعين الشاقولي والأفقي للقبضة.

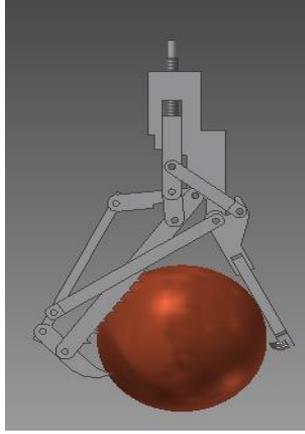
ولإجراء عملية المحاكاة قمنا بما يلي:

- ✓ إدخال نوع الروابط بين القطع (دورانية - انسحابية - كروية).
- ✓ إدخال قيمة العزم.
- ✓ إدخال قيمة معامل الاحتكاك بين مادة الحمل ومادة القبضة.
- ✓ إدخال قوة تسارع الجاذبية الأرضية.

5-1-1- الوضعية الشاقولية:

يبين الشكل التالي قبضة الروبوت في الوضعية الشاقولية وهو مُحمل بوزن 15 kg .

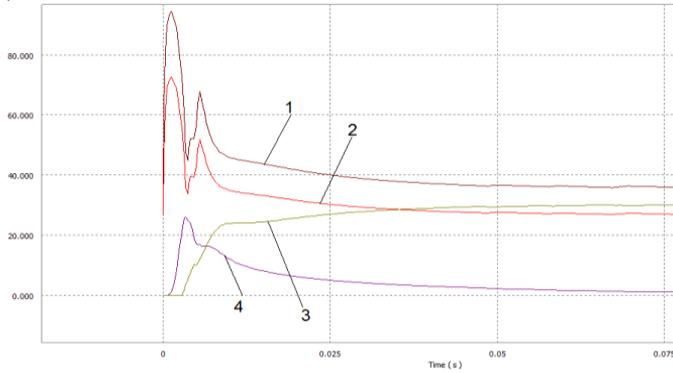
الشكل 20: القبضة الروبوتية في الوضعية الشاقولية.



تم تطبيق العزم النظري المدروس ($T_m=0.4 \text{ N.m}$) على محور المحرك، فكانت نتائج محاكاة القبضة في الوضعية الشاقولية كما هو موضح بالشكل:

الشكل 21: التمثيل البياني لقيم القوى بالنسبة للزمن في حالة الوضعية الشاقولية للميكانيزم.

$F(\text{Newton})$



حيث:

- 1 هو الخط البياني للقوة المطبقة من قبل الفك السفلي (الجانب الأيسر) على الحمل.
- 2 هو الخط البياني للقوة المطبقة من قبل الفك السفلي (الجانب الأيمن) على الحمل.
- 3 يعبر عن خطين بيانيين متطابقين للقوة المطبقة من قبل الفك العلوي (بجانبيه الأيمن والأيسر) على الحمل.

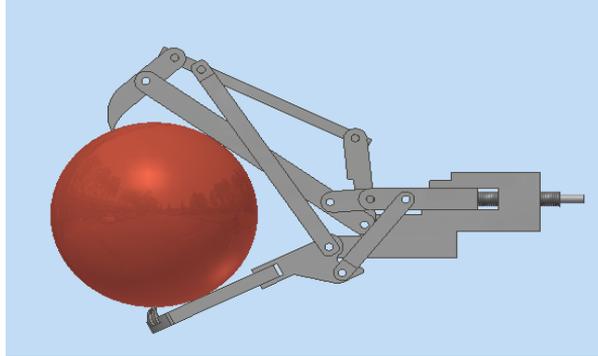
4 يعبر عن خطين بيانيين متطابقين للقوة المطبقة من قبل النايبين الأيمن والأيسر على الحمل.

نلاحظ من الشكل السابق:

- وجود اضطراب في قيم القوى المؤثرة على الحمل في بداية عملية المحاكاة ويعود ذلك لعملية الصدم البدائية الناتجة عن تصادم فكي القبضة مع الحمل، بينما نلاحظ استقرار قيم هذه القوى فيما بعد على القيم اللازمة.
- تطابق الخطوط البيانية للنايبين في الجانبين الأيمن والأيسر وكذلك للقطعة العلوية في كلا الجانبين ويعود ذلك لتوضع الحمل في مركز القبضة بشكل متناظر. أما سبب تباين الخطوط البيانية للقطعة السفلى في الجانبين فهو نتيجة توضع قطعة فوق الأخرى تصميمياً.
- التقارب بين قيم القوى المؤثرة من قبل الفكين العلوي و السفلي على الحمل، ويعود ذلك لتحمل الفكين الحمل بشكل متناظر تقريباً ضمن الوضعية الشاقولية.

5-1-2- الوضعية الأفقية:

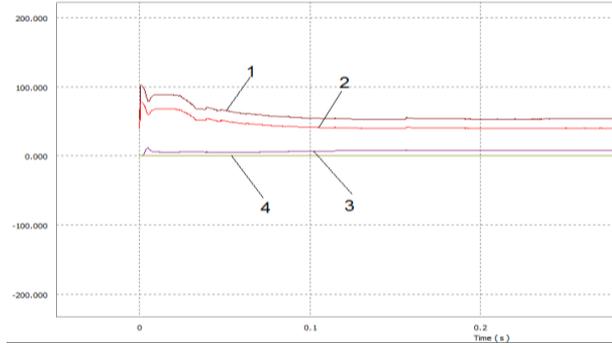
الشكل 22: القبضة الروبوتية في الوضعية الأفقية.



كذلك تم تطبيق العزم النظري المدروس ($T_m=0.4 \text{ N.m}$) على محور المحرك، فكانت نتائج المحاكاة للقبضة في الوضعية الافقية كما هو موضح بالشكل:

الشكل 23: التمثيل البياني لقيم القوى بالنسبة للزمن في حالة الوضعية الأفقية للميكانيزم.

$F(\text{Newton})$



من الشكل السابق نلاحظ أيضاً:

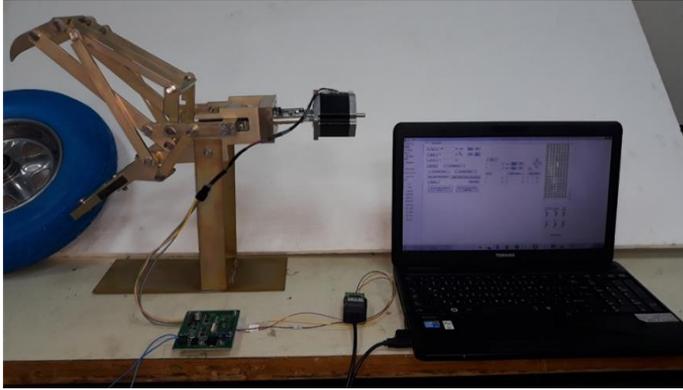
- وجود اضطراب في قيم القوى المؤثرة على الحمل في بداية عملية المحاكاة.
- تطابق الخطوط البيانية للنايين في الجانبين الأيمن والأيسر وكذلك للقطعة العلوية في كلا الجانبين وتباين الخطوط البيانية للقطعة السفلى في الجانبين.
- أن قيم القوى المؤثرة من قبل الفك السفلي على الحمل في هذه الحالة (الوضعية الأفقية) ذات قيم أعلى من الوضعية السابقة (الرأسية)، ويعود ذلك لتحمل الفك السفلي الجزء الأكبر من الحمل.

ختاماً، من خلال الدراسة الديناميكية السابقة نجد أن القبضة الروبوتية المُصممة قادرة على القبض والإمساك بالحمل المفروض عليها في الوضعيتين الشاقولية والأفقية.

5-2- التنفيذ العملي للقبضة الروبوتية:

تم تنفيذ وتجميع القبضة الروبوتية عملياً. لقيادة هذه القبضة عملياً تم الاعتماد على محرك خطوي يحقق المواصفات المطلوبة: $T=0.5$ N.m ، $\omega=1000$ Rpm ، حيث تم التحكم بعملية فتح وإغلاق القبضة مع امكانية تحديد قيمة الوضع الزاوي لفكيها. وتتم القيادة عن طريق إرسال الأوامر من الواجهة التخاطبية إلى الدارة الالكترونية التي بدورها تولد الإشارات اللازمة للمحرك.

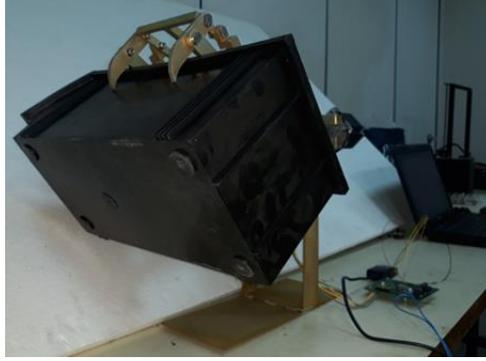
الشكل 24: القبضة الروبوتية المنفذة.



ثم تم اختبار قدرة القبضة على إمساك عدة أجسام بأحجام وأشكال وأوزان مختلفة كما هو موضح بالأشكال التالية.

الشكل 25: إمساك القبضة لأجسام بأحجام وأشكال مختلفة.





6- الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا المشروع تصميم وتنفيذ قبضة روبوتية تحاكي حركة فك الأفعى، مُفاداة بمفعل وحيد وتتمتع بزاوية فتح كبيرة تصل إلى 125 درجة لفيها العلوي والسفلي. تم بدايةً نمذجة القبضة هندسياً وحركياً مع توضيح آلية عملها. حيث تم تمثيل العلاقات الرياضية الخاصة بنموذجي القبضة الهندسيين (المباشر والعكسي) بيانياً من خلال برنامج الـ *Matlab* والتحقق من صحة هذه العلاقات من خلال مطابقة بعض النقاط التجريبية عملياً على برنامج الـ *Inventor*. بالإضافة لذلك تم دراسة القوى الستاتيكية للميكانيزم وإيجاد عزم المحرك المطلوب لإتمام عملية القبض. ثم تم التأكد من صحة النتائج عن طريق إجراء المحاكاة الديناميكية للميكانيزم بواسطة برنامج *Inventor*، ختاماً تم التحقق العملي من قدرة القبضة الروبوتية المقترحة على الإمساك بأجسام ذات أشكال وحجوم مختلفة.

يمكن العمل مستقبلاً على إضافة حساسات ضغط لمعرفة القوى التي يطبقها فكي القبضة العلوي والسفلي على الجسم. كذلك يمكن إضافة نظام رؤية للنظام بحيث يتمكن من تحديد شكل الجسم المراد إمساكه واختيار الوضعية المناسبة تلقائياً، كما يمكن دراسة التصميم الأمثلي للميكانيزم.

- [1] Endo,G, Togawa,K, Hirose,S, 1999 - **Study on self contained and terra in adaptive active cord mechanism.** Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo: IEEE: 111-117.
- [2] Frazzetta,Th, 1966 - **Studies on the morphology and function of the skull in the Aoidae (Serpentes).** Part 11. Morphology and function of the jaw apparatus in Python sebae and Python molurus. Morph. j. 118: 217-296.
- [3] Dullemeijer,P, Povel,Gde, 1972 - **The construction for feeding in rattlesnakes. Zoologische mededelingen.** j. 47(46):570-575.
- [4] Bolt,Re, Ewer,Rr, 1964 - **The functional anatomy of the head of the puff adder.** Bitis arietans (Merr.). Morph. j. 114:83-106.
- [5] Kley,Nj, 2006 - **Morphology of the Lower Jaw and Suspensorium in the Texas Blindsnake, Leptotyphlops dulcis (Scoleophidia: Leptotyphlopidae).** Journal of morphology. j. 267:494-515.
- [6] Paolo,D, Eugenio,G, 1996 - **Robotics for medical applications.** IEEE Robotics and Automation Magazine. j. 9:44-56.
- [7] Gutt,Cn, Oniu,T, Mehrabi,A, 2004 - **Robot-assisted abdominal surgery.** Br J Surg. j.91:1390-1397.
- [8] G,Endo, K,Togawa and S,Hirose, 1999 - **International Conference on Intelligent Robots and Systems.** (Tokyo, Japan, October 17-21, 1999). Vol. 3, p.1399.
- [9] T.H,Frazzetta, 1966 - **J. Morph.** Vol. 118 (1966) No.2,p.217.
- [10] K.V,Kardong, P,Dullemeijer and J.A.M,Fransen, 1986 - **Amphibia-Reptilia.** Vol.7 (1986) No.3, p.271.
- [11] Alexandra,Deufel, David,Cundall, 2010 - **Journal of Morphology.** Vol.271 (2010) No.1, p.75.
- [12] Zijuan,Liu, Jian,Fei, Zhuang,Fu, Weixin,Yan and Yanzheng,Zhao, 2011 - **Mechanical Design of Bionic Snake Mouth and its Analysis.** Advanced Materials Research Vols. 299-300 (2011) pp 1024-1027.

