

تصميم المسار الأمثل لحركة ذراع روبوت سداسي درجة الحرية

الدكتور ربيع حبيب*

عبد الرزاق دبور**

(تاريخ الإيداع 27 / 7 / 2015. قُبل للنشر في 10 / 11 / 2015)

□ ملخص □

اهتم الصناعيون بأتمتة مصانعهم لزيادة الانتاج وخفض التكاليف وتحسين جودة المنتج من خلال استخدام الأذرع الآلية في قيادة وانهاء معظم العمليات الانتاجية، حيث تتصف الأذرع الآلية بأنها هياكل ميكانيكية قابلة للبرمجة لأداء مهام تتميز بالدقة والسرعة والوثوقية.

استند البحث في استنتاج المسار الأمثل على توليد مسارات افتراضية (مثلثية، منحنية، مربعة) تعبر عن حركة الذراع الآلي للوصول إلى نقطة الهدف، حيث تم معرفة زمن الانتقال وزوايا الدوران والعزم في المفاصل تحت تأثير الجاذبية الأرضية من خلال دراسة الحركة الأفقية والشاقولية للذراع الآلي.

تبين حركة الذراع الآلي وفق المسارات المقترحة أن أفضل المسارات سلامة على محركات الذراع الآلي هو المسار النصف دائري كونه يحد من حدوث صدمات ميكانيكية أو ظهور قيم مرتفعة للعزم عند المفاصل. في حين تبين ان المسار الذي يحقق أقل زمن للوصول الى نقطة الهدف وبالتالي اقل كمية في الطاقة المستهلكة هو المسار المثالي في حالة الحركة الأفقية للذراع على الرغم من ظهور انحرافات حادة في مخططات العزم والطاقة نتيجة التغير المفاجئ في اتجاه الحركة.

يظهر التأثير السلبي للجاذبية الأرضية خصوصا عند حركة المفصل الثاني للأعلى أو الأسفل، مما يسبب بظهور قمم في منحنى الطاقة تعبر عن قيم مرتفعة للعزم في هذا المفصل.

الكلمات المفتاحية : نمذجة ذراع آلي لروبوت صناعي ، تصميم المسار ، الحركة الأمامية ، الحركة العكسية.

*أستاذ مساعد - قسم الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية
**طالب ماجستير - قسم الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

Designing Optimal Path for 6D of Robot Arm Motion

Dr. Rabie Habib*
Abd Alrazzak Dabbour**

(Received 27 / 7 / 2015. Accepted 10 / 11 / 2015)

□ ABSTRACT □

Industrialists interested automates their factories to increase production, reduce costs and improve quality by using robots in leadership and finishing most of the production processes, where robots characterized as mechanical structures programmable to perform tasks accurate, speed and reliability.

Research depend in concluding the optimal path on generating virtual paths (triangular, curved, square) reflects the robotic arm movement to reach the target point, where as it has been known moving time and angles of rotation and torque in the joints under the influence of gravity through the study of horizontal and vertical movement of the robotic arm.

A study of suggested trajectories for the robotic arm shows that the best paths on the safety of robotic arm motors is semi-circular path as limiting the occurrence of mechanical shocks or the appearance of high values of the joints torques. while showing that the path that achieves less time to reach the target point and less amount of energy is the triangular path in the case of horizontal motion of the robotic arm despite the emergence of sharp deviations in the torque and power schemas as a result of the sudden change in the direction of movement.

The negative impact of gravity is especially apparent when the second joint up or down movement, causing the appearance of peaks in energy curve reflects the high values of determination in this joint.

Keywords: Industrial Robot Arm Modeling, Path Planning, Forward kinematics, Inverse kinematics, MscAdams, Matlab.

* Associate professor, Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria

** Postgraduate Student, Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria

مقدمة:

انتشر استخدام الأذرع الآلية (الروبوتات) في العديد من المجالات منها الصناعية، الطبية، العسكرية، الفضائية، حيث يمكنها تنفيذ العديد من المهام مثل اللحام، الفك والتجميع، النقل والمناولة..... الخ وذلك ضمن شروط عمل معقدة ومتنوعة.

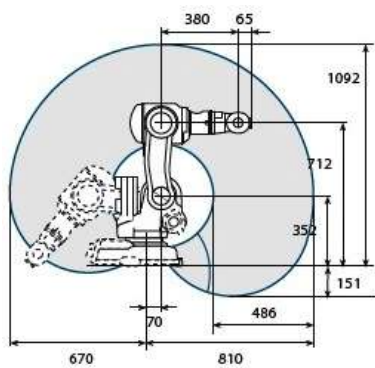
اهتم الصناعيون بتطوير مصانعهم لزيادة الانتاج وخفض التكاليف وتحسين جودة المنتج من خلال استخدام الأذرع الآلية في قيادة وانهاء معظم العمليات الانتاجية، حيث تتصف الأذرع الآلية بأنها هياكل ميكانيكية قابلة للبرمجة لأداء مهام لا يستطيع الانسان القيام بها، حيث تتميز بالدقة والسرعة والوثوقية مقارنة بالأعمال التي يؤديها الإنسان. ركز العديد من الباحثين في الدراسات السابقة على ايجاد حلول لمشكلة انجاز العمل الموكل إلى الذراع الآلي بأقل زمن ممكن بالإضافة إلى جعل الذراع الآلي يتحرك ضمن مجال قيم تسارعات مقبولة للتقليل من تأثير القوى الديناميكية مما يؤدي إلى تخفيف الاهتزازات التي يتعرض لها الذراع الآلي [2] [3].

أما مؤخرًا فقد تم التركيز على مشكلة تقليل الطاقة اللازمة لإنجاز العمل باستخدام الأذرع الآلية، وذلك من خلال دراسة تأثير نعومة المسار الذي تتحرك فيه أداة الذراع الآلي على كمية الطاقة المستهلكة [3] [4].

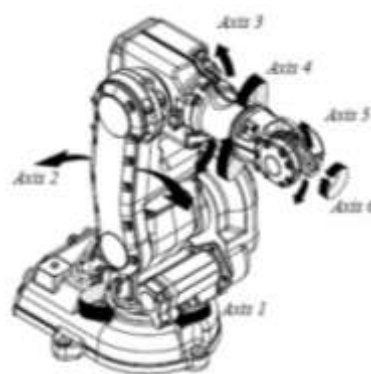
كما أن بعض الدراسات حللت تأثير المسار المقترح على فعالية الإيقاف الفوري لحركة الذراع الآلي في حال حدوث خلل ما، مما يضمن سلامة العمال في الوسط المحيط للذراع الآلي بالإضافة إلى حماية الذراع من الضرر، فمن المعلوم أن المؤثر الرئيسي في قيمة القوى الديناميكية هو قيمة التسارع لأداة الذراع الآلي فعلى المسار المقترح أن يحقق أدنى قيم للقوى الديناميكية دون التأثير على كفاءة العملية الإنتاجية [6] [7].

أهمية البحث و أهدافه:

تكمن أهمية البحث في ايجاد المسار الأمثل لحركة الذراع الآلي لأداء مهمة محددة بأقل زمن ممكن وذلك بهدف زيادة الانتاج وخفض تكاليفه. وبالتالي يهدف البحث إلى تصميم مسار لذراع آلي صناعي من نوع IRB 140 المصمم من قبل شركة ABB، كما يبين الجدول (1) والشكل (1) مواصفات هذا الذراع وفق الشركة المصنعة [8].



الشكل (C-1) أبعاد الذراع الآلي



الشكل (b-1) درجات حرية



الشكل (a-1) الشكل العام للذراع الآلي

الشكل (1) الرسوم التوضيحية للذراع الآلي ABB IRB 140

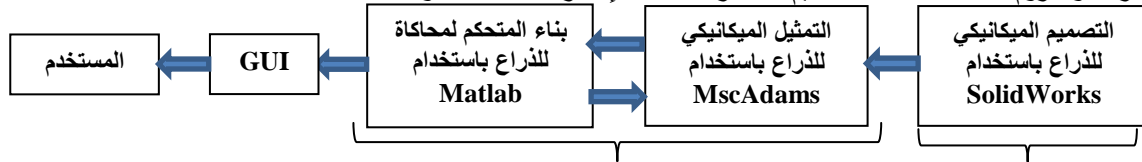
الجدول (1) مواصفات مفاصل الذراع الآلي ABB IRB 140

| رقم المفصل | مجال زاوية دوران المفصل | أقصى سرعة زاوية |
|------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 360 | 200 °/s |
| 2 | 200 | 200 °/s |
| 3 | 280 | 260 °/s |
| 4 | 400 | 360 °/s |
| 5 | 230 | 360 °/s |
| 6 | 800 | 450 °/s |

يستخدم هذا الذراع الآلي في العمليات الصناعية حيث يملك ست درجات حرية كما هو مبين بالشكل (b-1). مهمة هذا الذراع الآلي النقاط منتج ما من مكان محدد ونقله في فضاء ثلاثي البعد إلى مكان آخر ومن ثم يعود ويكرر هذه العملية مرات متعددة في اليوم من خلال البحث عن المسار الأمثل لأداء هذه العملية بأقل زمن ممكن.

طرائق البحث و موادہ:

بما ان الهدف الاساسي من البحث هو دراسة ذراع آلي سداسي درجة الحرية من نوع (ABB IRB 140) بهدف ايجاد المسار الأمثل لأداء العمليات الصناعية المختلفة، فإنه كمرحلة أولى يجب البدء بالتصميم الميكانيكي لهذا الروبوت باستخدام برنامج التصميم الميكانيكي SolidWorks، وفي المرحلة الثانية يصدر هذا التصميم إلى برنامج MscAdams لتمثيل النموذج الميكانيكي للنظام، ومن ثم يتم ربط برنامج MscAdams مع برنامج Matlab/Simulink لتمثيل المتحكم في النظام. عند دراسة الحركة العكسية (Inverse Kinematic) لا بد من ايجاد تمثيل دينايفيت-هارينترغ (Denavit-Harbenterg (D-H)) للذراع، لنبدأ بعدها بقياس البارامترات اللازمة كالموضع والسرعة والعزوم عند المفاصل لتصميم المسار الأمثل للإنجاز العمل المطلوب.



المرحلة الثانية

المرحلة الأولى

الشكل(2) المخطط الصندوقي لنمذجة وتصميم المسار للذراع الآلي

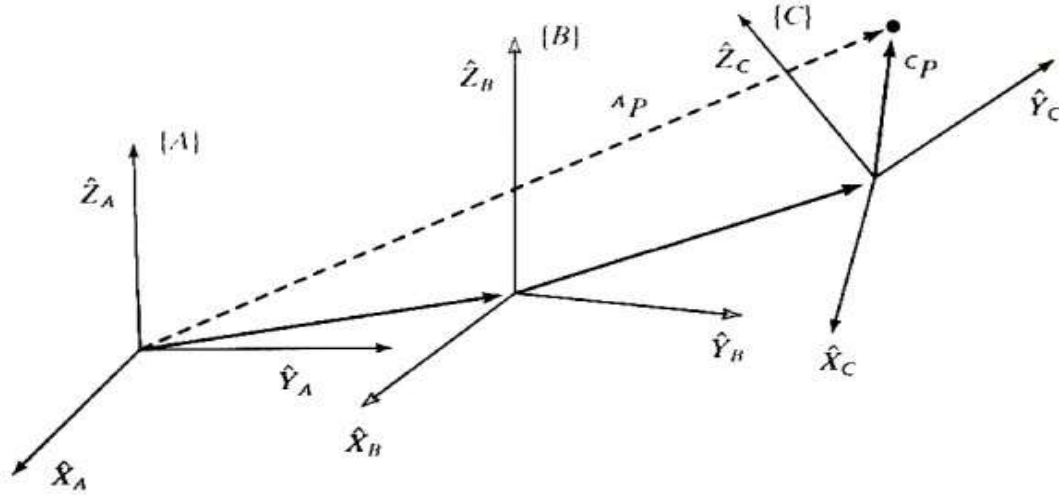
1. تمثيل دينايفيت-هارينترغ (D-H) Denavit-Harbenterg

تتكون الأذرع الآلية من وصلات ومفاصل، بحيث تؤدي كل وصلة حركة انسحابية أو دورانية تبعاً لنوع المفصل. وإن أقرب مثال على ذلك هو ذراع الإنسان المكون من العظام التي تمثل الوصلات والمتصلة فيما بينها بمفاصل دورانية كمفصل الكتف ومفصل المرفق. وتعتبر المفاصل الدورانية الأكثر استخداماً لبناء الأذرع الآلية وخصوصاً الروبوتات الصناعية.

تحتوي الأذرع الآلية على عدة وصلات تشكل بين محاور دورانها زوايا أويلر (Euler angles) لتكافئ المعصم في ذراع الإنسان. كما تحتوي نهايتها على المنفذ الطرفي (end-effector) كمقبض والذي يشابه عمله

أصابع اليد لالتقاط الأجسام [11]. يهدف إيجاد النموذج الرياضي الممثل للذراع الآلي على تحديد موضع واتجاه المنفذ الطرفي (end-effector) مقارنة بالقاعدة، وبالتالي يجب علينا تعيين الاطر الإحداثية (Coordinate Frames) لقاعدة و نهاية الذراع الآلي بالإضافة إلى جميع المفاصل.

يمكن تمثيل انتقال إطار (Frame) بالنسبة لإطار آخر من خلال الشعاع ${}^i P_{i+1} : 3 \times 1$ [9].



الشكل (3) اطارات الإحداثيات

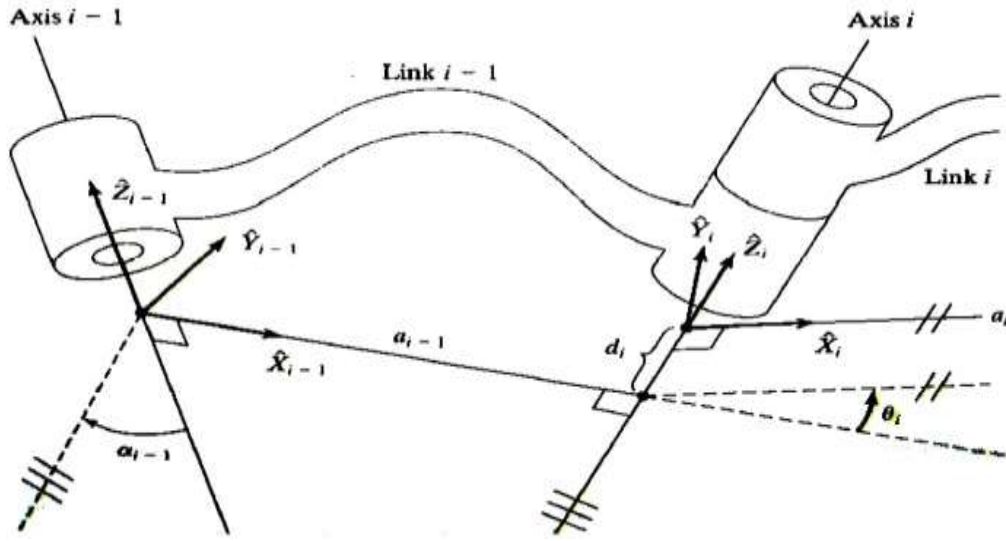
أما تمثيل دوران إطار بالنسبة للإطار آخر يتم من خلال مصفوفة الدوران ${}^{i+1} R : 3 \times 3$. في النهاية لتمثيل انتقال ودوران الإطار $i + 1$ بالنسبة للإطار i ، باستخدام مصفوفة ${}^{i+1} T : 4 \times 4$ التي يمكن إيجادها من خلال العلاقة (1):

$${}^{i+1} T = \begin{bmatrix} {}^{i+1} R & {}^i P_{i+1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

كما تم استخدام تمثيل دينايفيت-هارينترغ المعدلة Modified Denavit-Harberteng (D-H) لوصف

تمثيل الإطارات في الأذرع الآلية. وكما يوضح الشكل (4) تعرف بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ كالتالي [11]:

- ✓ a_i : طول الوصلة، المسافة من \bar{Z}_i إلى \bar{Z}_{i+1} وفق المحور \bar{X}_i .
- ✓ α_i : انحراف الوصلة، الزاوية بين \bar{Z}_i و \bar{Z}_{i+1} حول المحور \bar{X}_i .
- ✓ d_i : انزياح الوصلة، المسافة من \bar{X}_{i-1} إلى \bar{X}_i وفق المحور \bar{Z}_i .
- ✓ θ_i : زاوية المفصل، الزاوية بين \bar{X}_{i-1} و \bar{X}_i حول المحور \bar{Z}_i .



الشكل (4) اطارات الوصلة و بارامترات الحركة

عند استخدام تمثيل دينايفيت-هارينترغ المعدلة عندها يمكن تمثيل مصفوفة التحويل العامة وفق الآتي:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

بحيث تم استخدام الاختصارات التالية في كتابة المعادلات: $s\theta_i = \sin \theta_i$ و $c\theta_i = \cos \theta_i$.

يتم حساب مصفوفة التحويل النهائية من أجل N مفصل في الذراع الآلي. بين القاعدة و نهاية الذراع الآلي من

خلال جداء مصفوفات التحويل لجميع المفاصل كما يلي:

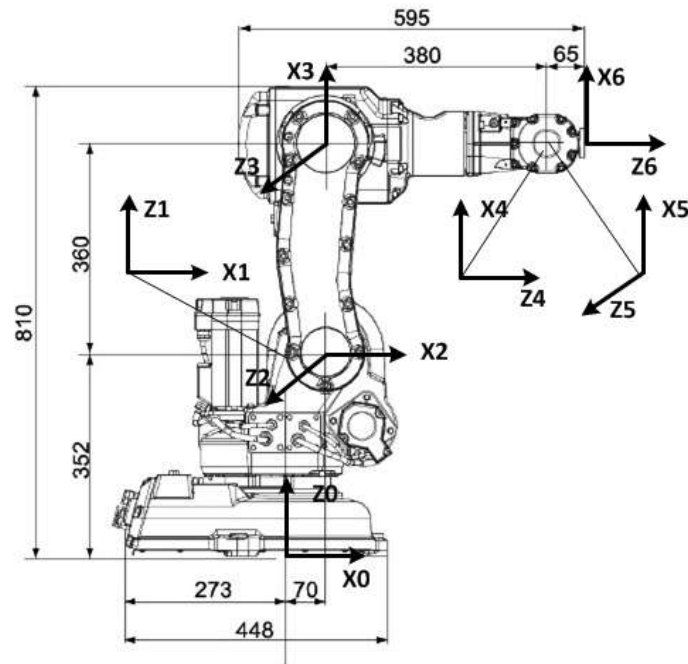
$${}^0T_N = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots \dots \dots {}^{N-1}T_N, N = \text{joints Number} \quad (3)$$

تعرف هذه العملية بالحركة الأمامية للذراع (المباشر) الذي يعرف بحساب موضع واتجاه المنفذ الطرفي (end-

effector) انطلاقاً من معرفة بارامترات المفاصل. على عكس ذلك، تحدد الحركة العكسية بحساب متغيرات المفاصل من خلال معرفة موضع واتجاه نهاية الذراع الآلي. تمكن صعوبة الحركة العكسية عند وجود عدة حلول ممكنة لاستنتاج

متغيرات المفاصل والتي تتحقق من خلالها معرفة الموضع و الاتجاه المراد لنهاية الذراع الآلي [10].

يوضح الشكل (5) مواضع الإطارات وأبعاد الذراع الآلي والبارامترات الأربعة لكل مفصل a_i ، α_i ، d_i و θ_i .



الشكل (5) بارامترات الحركة واسناد الإطارات للذراع الآلي ABB IRB 140

الجدول (2) بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ المعدلة للذراع الآلي IRB 140

| θ_i | d_i | α_{i-1} | α_{i-1} | i |
|------------|-------|----------------|----------------|-----|
| θ_1 | 352 | 0 | 0 | 1 |
| θ_2 | 0 | 70 | 90 | 2 |
| θ_3 | 0 | 360 | 0 | 3 |
| θ_4 | 380 | 0 | 90 | 4 |
| θ_5 | 0 | 0 | -90 | 5 |
| θ_6 | 65 | 0 | 90 | 6 |

2. الفرضيات

كما يبين الشكل (4) فإن محاور المفاصل 4، 5 و 6 تتقاطع في نقطة وحيدة يمكن تمثيلها بمركز المعصم والتي من خلالها يمكن التحكم بتوجيه الذراع الآلي بشكل مشابه لمفصل اليد باستخدام زوايا أويلر (pitch, roll, yaw).

سيتم خلال البحث تحليل الوصلات الثلاث الأولى من الذراع الآلي لتحديد أطوال الوصلات وزوايا دوران

المفاصل (1، 2، 3) من أجل إيجاد احداثيات مركز المعصم (P_{xw}, P_{yw}, P_{zw}) .

3. الحركة الأمامية للذراع (Forward Kinematics)

تكون الحركة الأمامية بسيطة نسبياً إذا تم معرفة بارامترات تمثيل دينايفيت-هارينترغ لمعرفة زوايا المفاصل وبالتالي لتحديد احداثيات مركز المعصم. تتم معرفة مسافات الانتقال وزوايا الدوران لمركز المعصم بالنسبة لمركز

قاعدة الذراع الآلي من خلال إيجاد مصفوفة التحويل لكل سطر من اسطر الجدول (2) ومن ثم استخدام المعادلة (3) لاستنتاج مصفوفة التحويل النهائية والتي هي عبارة عن جداء مصفوفات التحويل لكل مفصل .

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_{xw} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_{yw} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_{zw} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

بحيث

$$r_{11} = c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6)$$

$$r_{12} = c_1[-c_{23}c_4c_5c_6 + s_{23}s_5c_6] + s_1s_4c_5c_6$$

$$r_{13} = c_1[c_{23}c_4c_5 + s_{23}s_5] + s_1s_4c_5$$

$$r_{21} = s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1(s_4c_5c_6 - c_4s_6)$$

$$r_{22} = s_1[c_{23}c_4c_5c_6 + s_{23}s_5c_6] + c_1s_4c_5c_6$$

$$r_{23} = s_1[c_{23}c_4c_5 + s_{23}s_5] - c_1s_4c_5$$

$$r_{31} = s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + c_{23}s_5c_6$$

$$r_{32} = -s_{23}c_4c_5c_6 - c_{23}s_5s_6$$

$$r_{33} = s_{23}c_4c_5 - c_{23}c_5$$

$$P_{xw} = c_1(s_{23}d_4 + c_2a_2 + a_1)$$

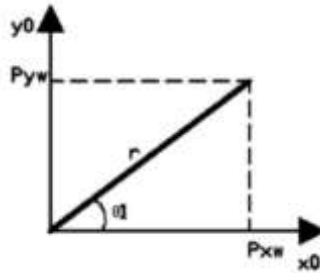
$$P_{yw} = s_1(s_{23}d_4 + c_2a_2 + a_1)$$

$$P_{zw} = -c_{23}d_4 + s_2a_2 + d_1$$

بحيث تم استخدام الاختصارات التالية في كتابة المعادلات: $c_i = \cos(\theta_i)$ و $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$.

4. الحركة العكسية للذراع (Inverse Kinematics)

تهدف الحركة العكسية إلى تحديد قيم زوايا المفاصل من خلال معرفة احداثيات مركز المعصم. كما تكمن صعوبة الحركة العكسية في وجود عدة حلول ممكنة قيم زوايا المفاصل من أجل موضع وحيد لمركز المعصم. فعلى سبيل المثال في حالة ذراع آلي سداسي درجة الحرية فإنه ينتج لدينا 16 حل مختلف لقيم زوايا مفاصل الذراع الآلي وذلك لموضع وحيد لمركز المعصم. فعند دراسة الذراع الآلي من نوع ABB 140 - يتم تقسيم الحركة العكسية إلى قسمين: في الأول يتم إيجاد زوايا المفاصل الثلاث الأولى التي تحقق تموضع مركز المعصم في الهدف المطلوب، أما في القسم الثاني يتم حساب زوايا التوجيه للمعصم (زوايا أويلر).



الشكل (6) مسقط مركز المعصم على المستوي xy

من الشكل (6) وبمعرفة أطوال الوصلات والمسافة r واستخدام التوابع المثلثية يمكن إيجاد حلين لتحديد قيمة زاوية الدوران (θ_1) حيث أحد هذين الحلين يتحقق عندما تكون كلا من قيمة x و y سالبة.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_{yw}}{P_{xw}} \right) = a \tan 2(P_{yw}, P_{xw}) \quad (5)$$

$$\text{OR } \theta_1 = \pi + \tan^{-1} \left(\frac{P_{yw}}{P_{xw}} \right) = a \tan 2(-P_{yw}, -P_{xw}) \quad (6)$$

لإيجاد زوايا الدوران للمفصل الثاني و الثالث يجب الانتقال إلى مستو يضم الوصلة الثانية والثالثة من وصلات الذراع الآلي شكل (5) ومن ثم الاعتماد على العلاقات المثلثية وقيمة الزاوية θ_1 حيث يمكننا كتابة العلاقة التالية:

$$\cos \theta_3 = \frac{(P_{xw} + a_1 \cos \theta_1)^2 + (P_{yw} + a_1 \sin \theta_1)^2 + (P_{zw} - d_1)^2 + a_2^2 + d_4^2}{2a_2 d_4} = D \quad (7)$$

باعتبار $\theta_3 = \cos^{-1} D$ ، يمكن حساب قيمة الزاوية θ_3 من خلال العلاقة التالية:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \right) = a \tan 2(\pm \sqrt{1 - D^2}, D) \quad (8)$$

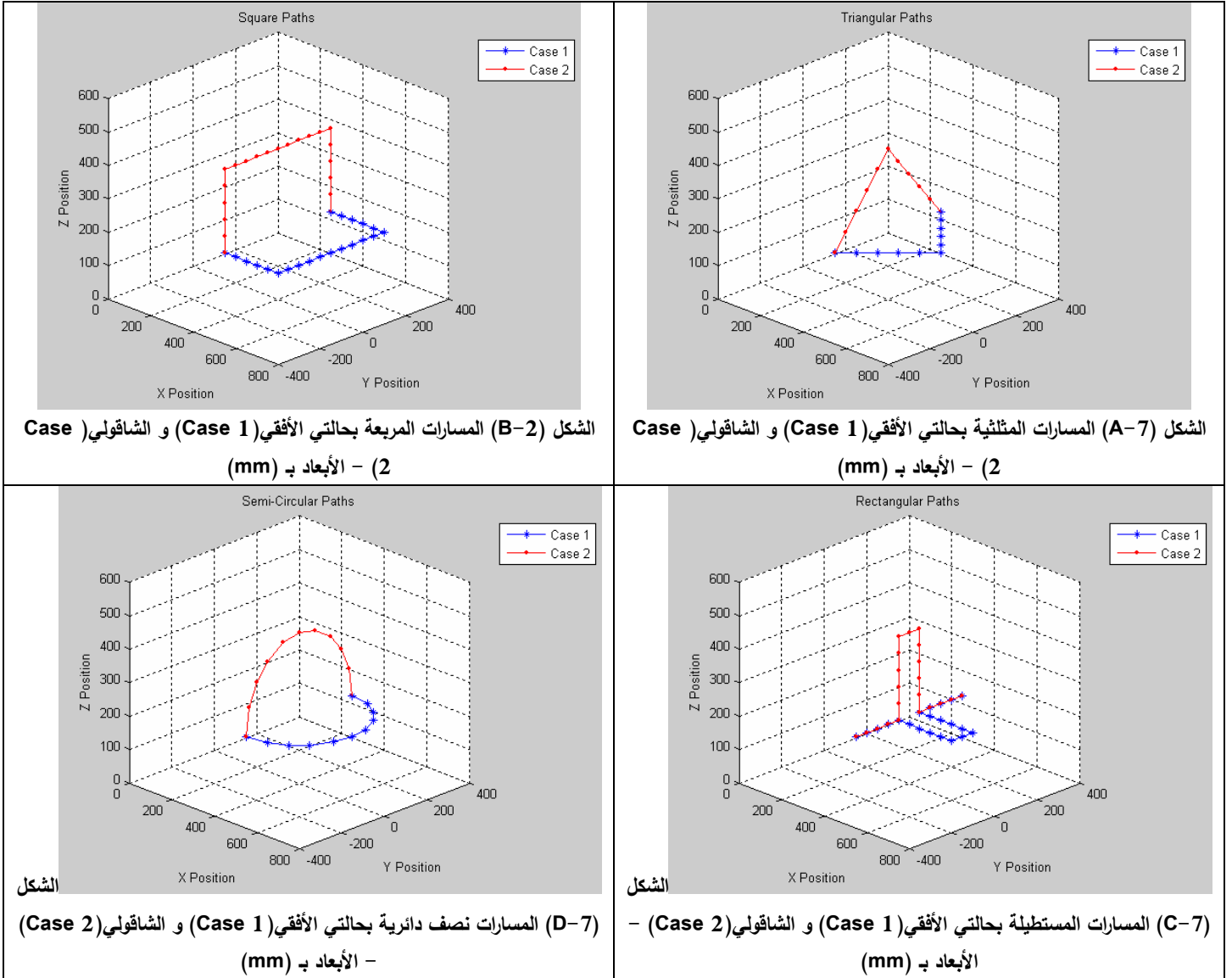
بشكل مشابه يمكننا حساب قيمة زاوية دوران المفصل الثاني للذراع الآلي θ_2 وفق العلاقة التالية:

$$\left(P_{zw} - d_1, \sqrt{(P_{xw} + a_1 \cos \theta_1)^2 + (P_{yw} + a_1 \sin \theta_1)^2} \right) - a \tan 2(d_4 \sin \theta_3, a_2 + d_4 \cos \theta_3) \quad (9)$$

النتائج والمناقشة:

تم توليد مسارات افتراضية تعبر عن حركة الذراع الآلي للوصول إلى نقطة الهدف مع الأخذ بعين الاعتبار الشكل المثلثي والمنحني والمربع لهذه المسارات المبينة بالشكل (7). وتم الحصول على مميزات المسارات (زمن الانتقال ومسافة الانتقال والطاقة المستهلكة) كما هو مبين بالجدول (3) باستخدام برنامج الماتلاب.

استند البحث في نمذجة حركة الذراع الآلي على ربط برنامج الماتلاب مع برنامج MscAdams لاختبار جميع المسارات المقترحة حيث تم دراسة المتغيرات التالية: زمن الانتقال وزوايا الدوران والسرعة الزاوية والتسارع الزاوي لمفاصل الذراع الآلي وكذلك العزم المطبق على المفاصل. كما تم خلال الدراسة ادخال تأثير الجاذبية الأرضية على حركة مفاصل الذراع الآلي وبالتالي دراسة طاقة المفاصل من خلال معرفة قيمة العزم في المفصل خلال الزمن. سوف يتم عرض نتائج عملية النمذجة لحركة الوصلات الثلاث الأولى للذراع الآلي لمحاكاة المسارات المقترحة وإيجاد قيمة الطاقة والعزم لكل منها.



الشكل (B-2) المسارات المربعة بحالتي الأفقي (Case 1) و الشاقولي (Case 2) - الأبعاد بـ (mm)

الشكل (A-7) المسارات المثلثية بحالتي الأفقي (Case 1) و الشاقولي (Case 2) - الأبعاد بـ (mm)

الشكل (D-7) المسارات نصف دائرية بحالتي الأفقي (Case 1) و الشاقولي (Case 2) - الأبعاد بـ (mm)

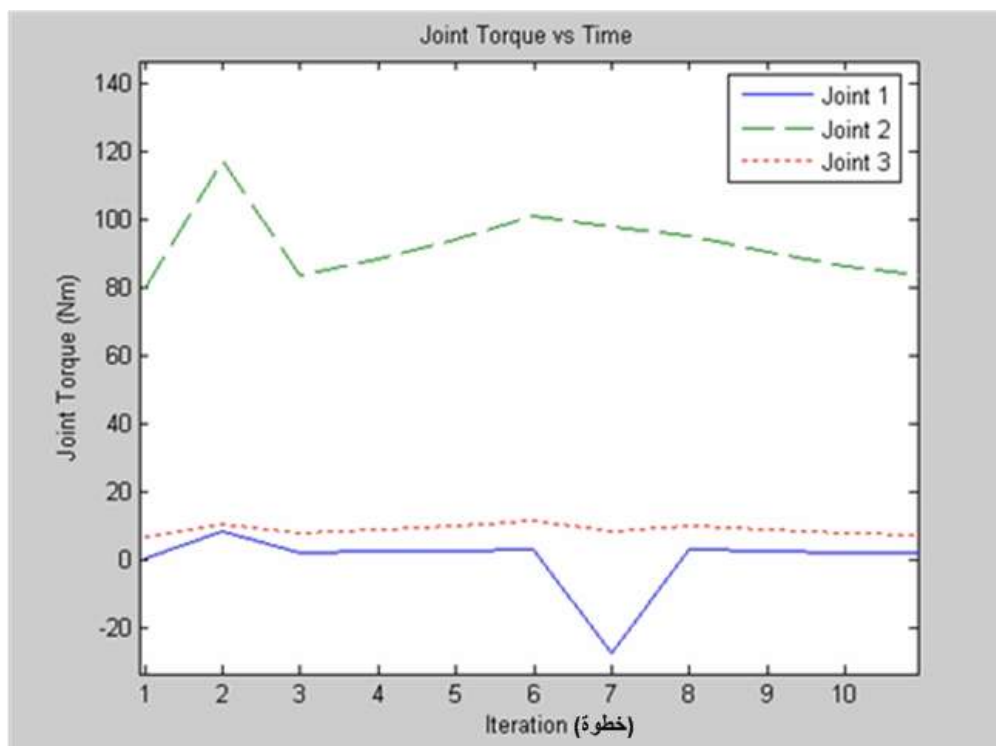
الشكل (C-7) المسارات المستطيلة بحالتي الأفقي (Case 1) و الشاقولي (Case 2) - الأبعاد بـ (mm)

الشكل (7) أشكال المسارات المقترحة

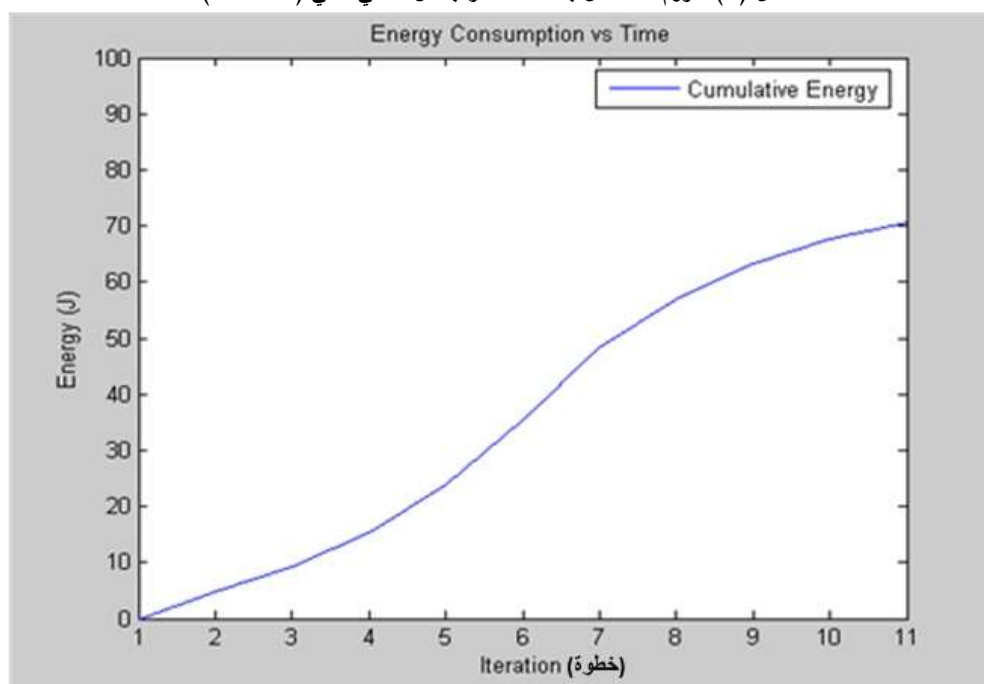
1. نتائج اختبار المسارات الأفقية

1.1. حالة مسار بشكل مثلث (case 1)

تبين من دراسة هذا المسار أقل مسافة انتقال بين جميع المسارات المختبرة (707 mm) وأقل زمن للانتقال على كامل المسار (2.4 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (8) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل نقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي. كما يبين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (9) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (70.49J).



الشكل (8) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مثلثي أفقي (Case 1)

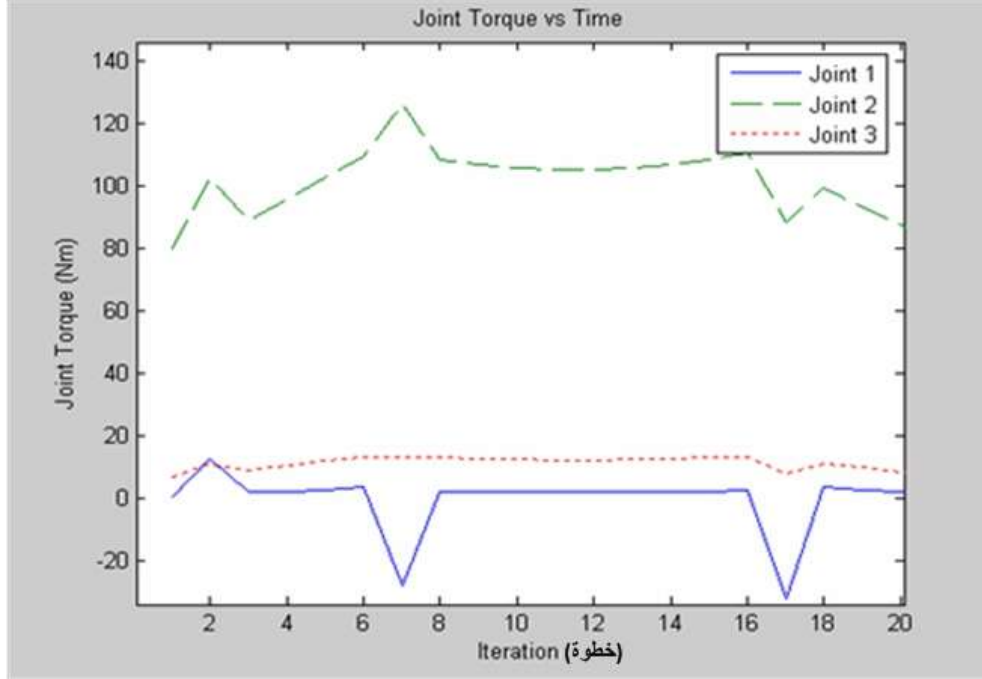


الشكل (9) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مثلثي أفقي (Case 1)

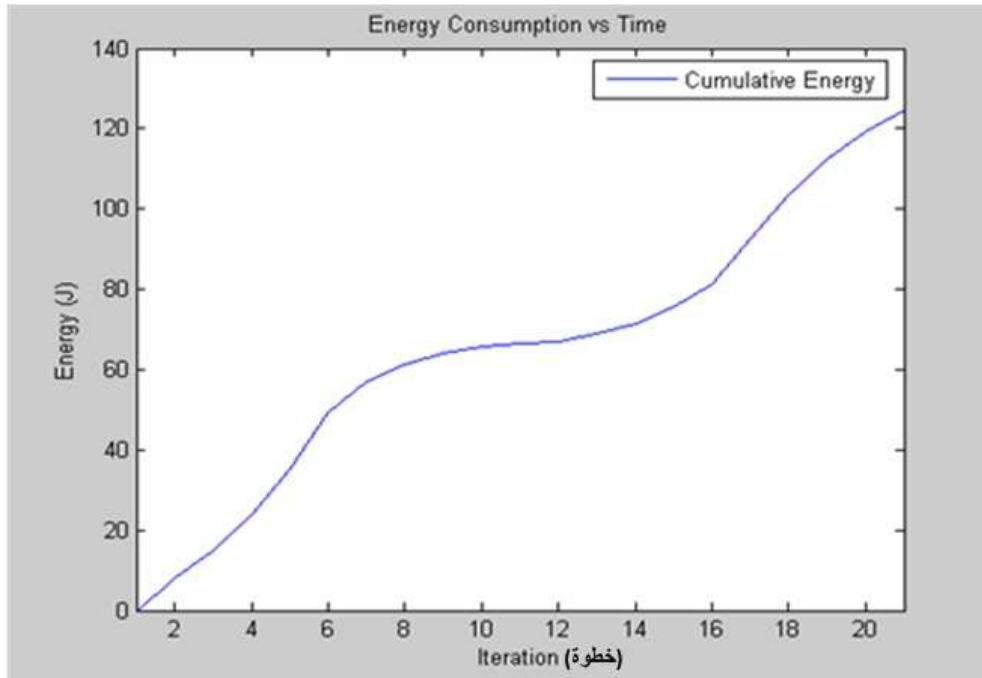
2.1. حالة مسار بشكل مربع (case 1)

يمتلك هذا المسار أكبر مسافة انتقال بين جميع المسارات المختبرة (1000 mm) و يتم الانتقال على كامل المسار خلال (2.4 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (10) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة

الثانية والثالثة للذراع الآلي. كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (11) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (124.83 J).



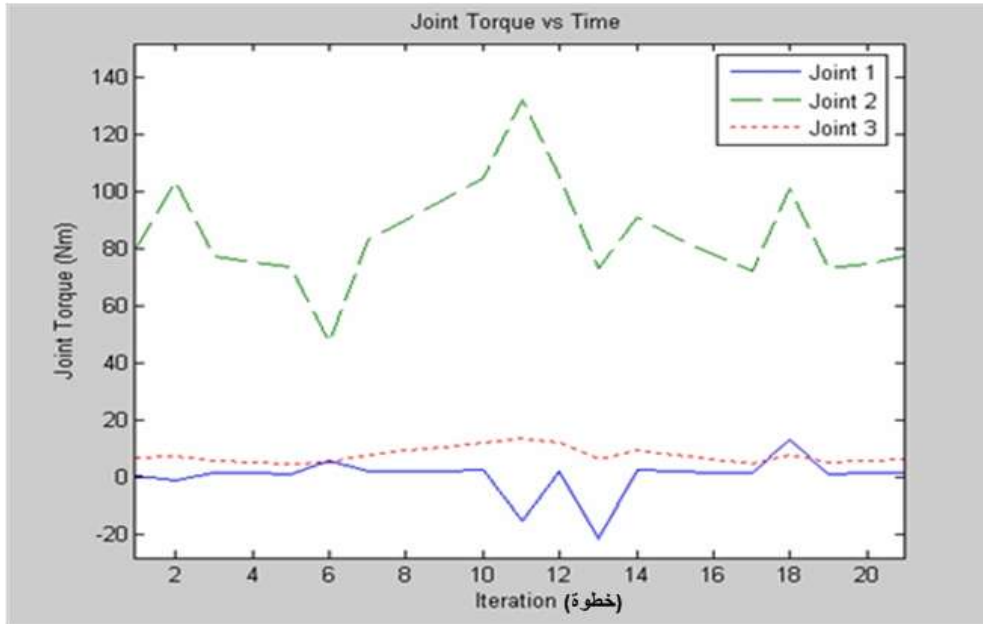
الشكل (10) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مربع أفقي (Case 1)



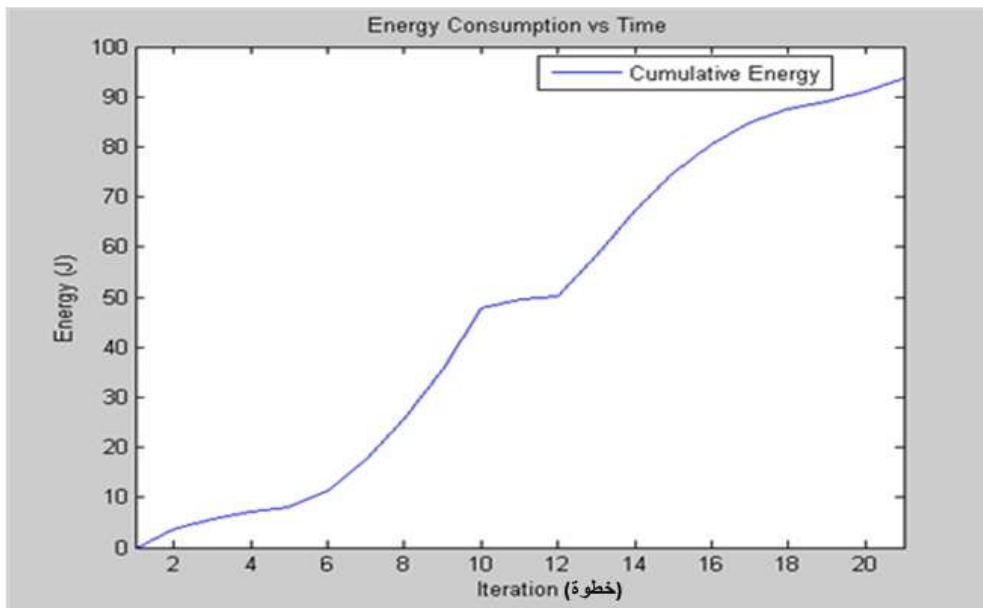
الشكل (11) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مربع أفقي (Case 1)

3.1. حالة مسار بشكل مستطيل (case 1)

يمتلك هذا المسار أكبر مسافة انتقال بين جميع المسارات المختبرة (1000 mm) ويتم الانتقال على كامل المسار خلال (4.3 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (12) وجود خمسة قمم احداها عند بداية الحركة و البقية عند نقاط الانعطاف. كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (13) فإن قيمة الطاقة التي يحتاجها الذراع لإنجاز هذا لم تختلف بشكل كبير عن مقدار الطاقة المستهلكة في حالة المسار بشكل مربع بحيث تبلغ قيمة (J 93.81).



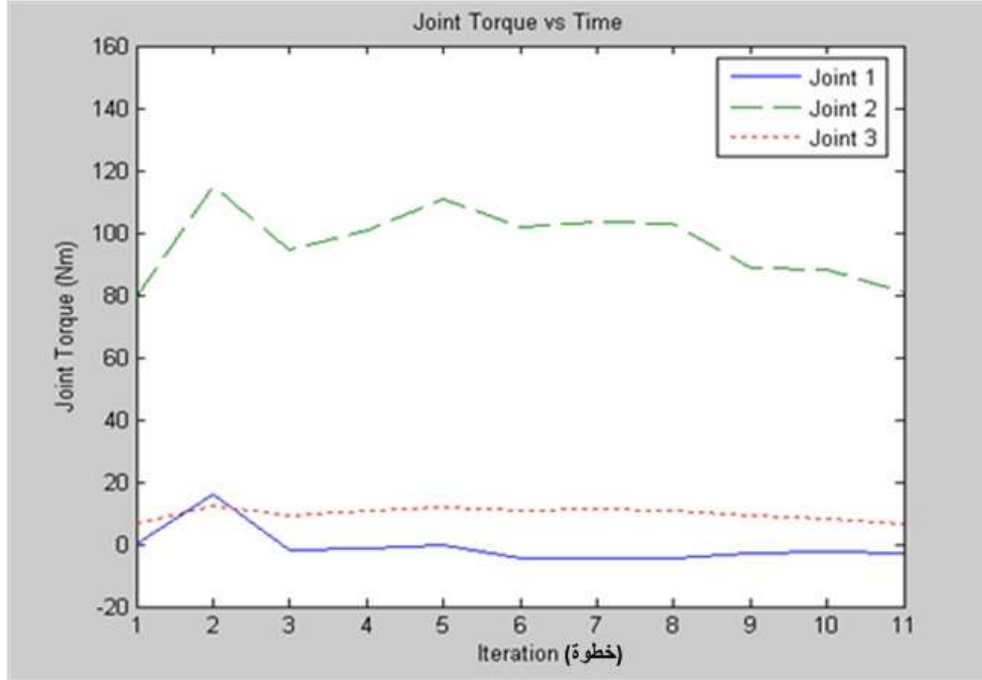
الشكل (12) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مستطيل أفقي (Case 1)



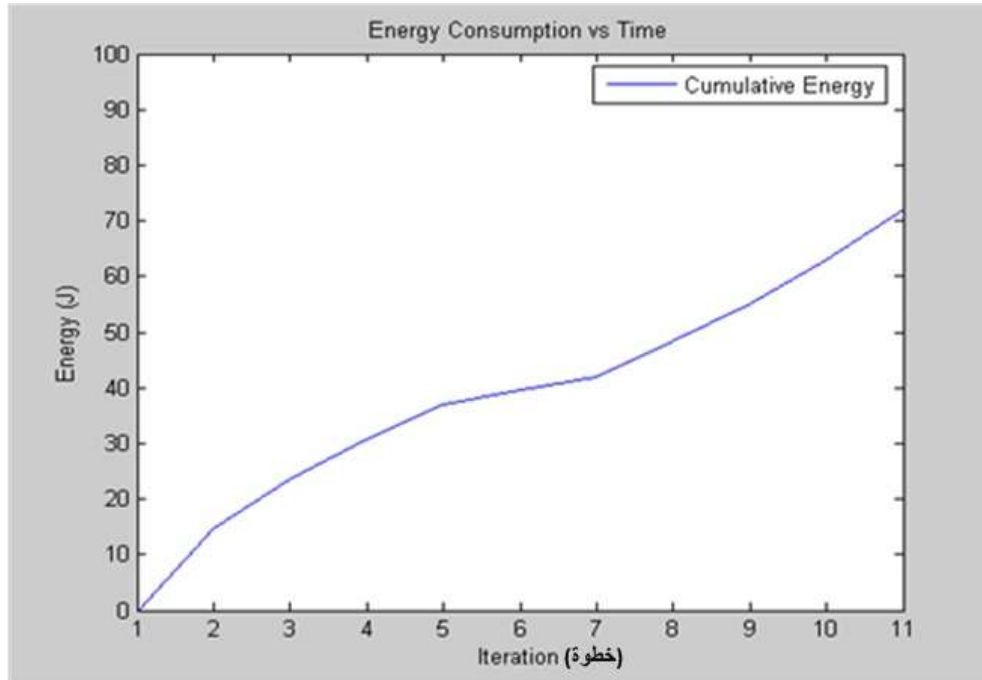
الشكل (13) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مستطيل أفقي (Case 1)

4.1 . حالة مسار بشكل نصف دائري (case 1)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال هي (785 mm) و يتم الانتقال على كامل المسار خلال (2.5 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (14) وجود قمة وحيدة في بداية المسار. كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (15) أن قيمة الطاقة التي يحتاجها الذراع لإنجاز هذا المسار هي (72.13 ج).



الشكل (14) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل نصف دائري أفقي (Case 1)



الشكل (15) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل نصف دائري أفقي (Case 1)

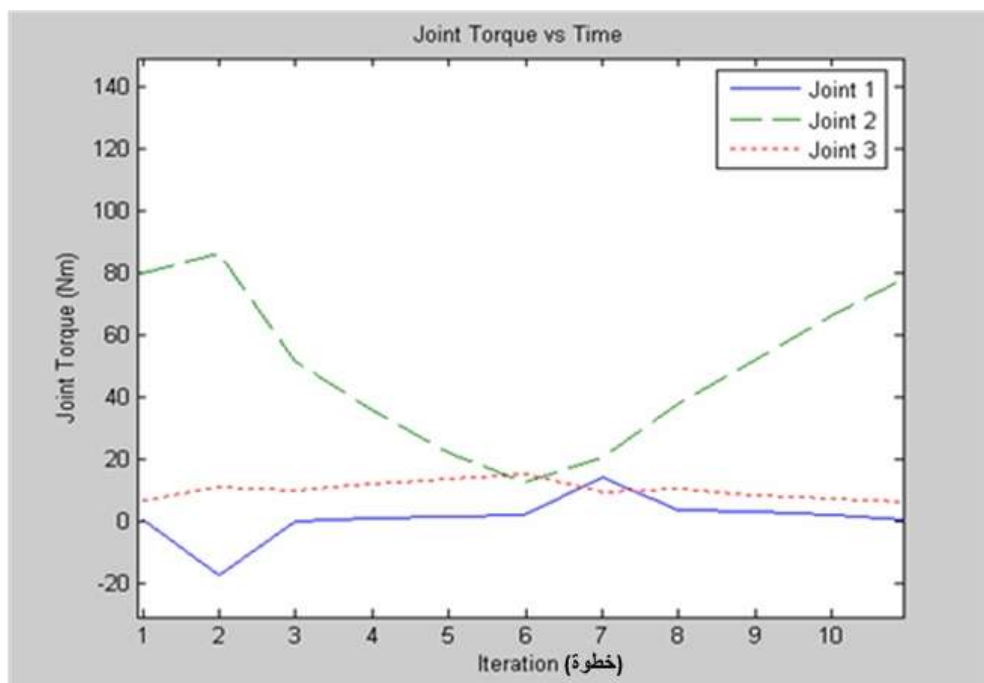
من دراسة المسارات الأفقية يمكننا استنتاج النقاط التالية:

- ✓ يعتبر المسار بشكل مثلثي والمسار بشكل نصف دائري أفضل المسارات الأفقية المقترحة من حيث زمن الانتقال ومسافة الانتقال والطاقة المستهلكة.
- ✓ تبلغ قيم زمن الانتقال و مسافة الانتقال و الطاقة المستهلكة قيم متقاربة بالنسبة للمسارين السابقين.
- ✓ يعتبر المسارين بشكل مربع و مستطيل من أسوء المسارات بسبب طول المسار و الزمن اللازم للانتقال على كامل المسار.
- ✓ تحتوي مخططات العزم - الزمن على عدة قمم بسبب التغيرات المفاجئة في اتجاه حركة الذراع الآلي الناتجة عن تغيرات في قيم التسارعات الخطية بالتالي التأثير على قيم عزوم المفاصل وكمية الطاقة المستهلكة.
- ✓ يتميز المسار بشكل نصف دائري بدرجة كبيرة من النعومة بالتالي لا توجد تغيرات مفاجئة باتجاه حركة الذراع الآلي ،مما ينعكس على مخططات عزوم المفاصل فنلاحظ اختفاء جميع القمم في المخططات ما عدا أول قمة عند بدء حركة الذراع الآلي.

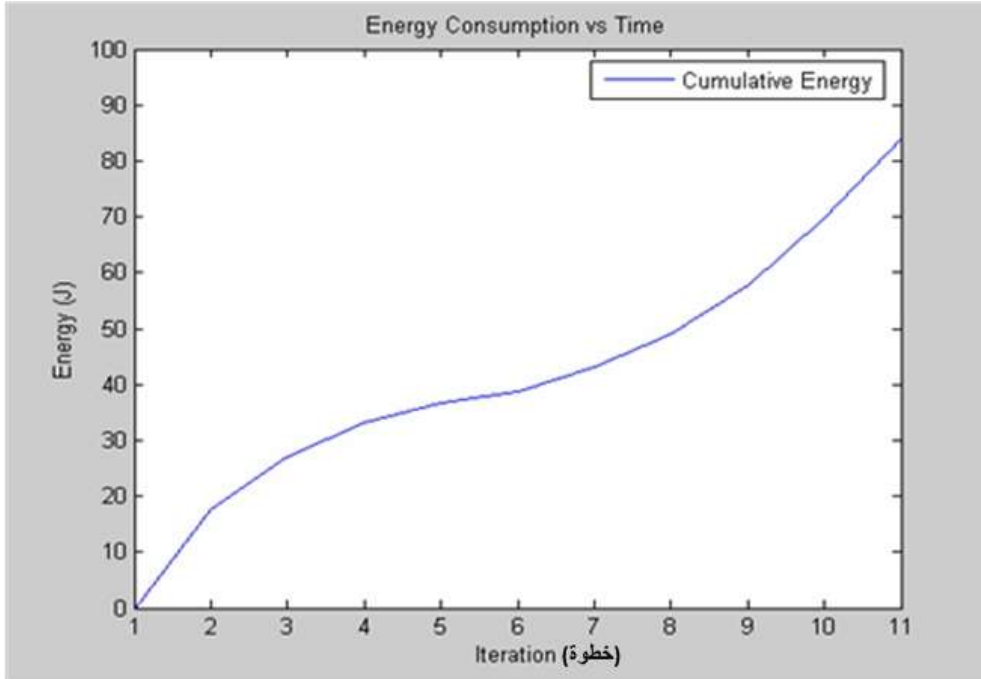
2. النتائج في حالة المسارات الشاقولية

2.1. حالة مسار بشكل مثلث (case 2)

يمتلك هذا المسار أقل مسافة انتقال بين جميع المسارات المختبرة (707 mm) و أقل زمن للانتقال على كامل المسار (2.4 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (16) وجود قمتين احداها عند بداية الحركة و الأخرى عند تغيير اتجاه الحركة كما هو الحال في حالة المسار المثلثي بشكل أفقي . كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (17) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (83.94 ج).



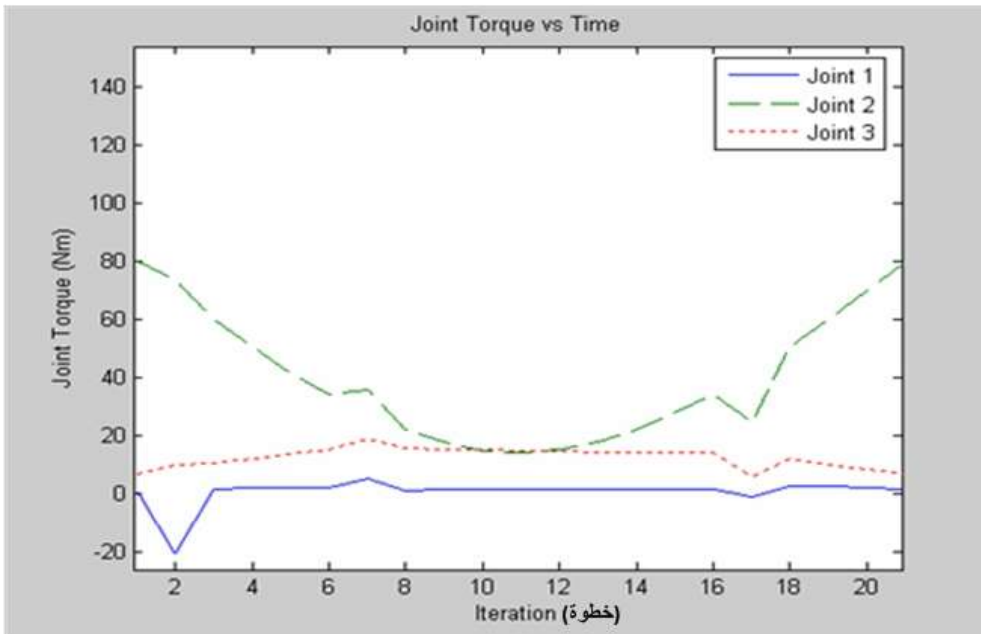
الشكل (16) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مثلثي شاقولي (Case 2)



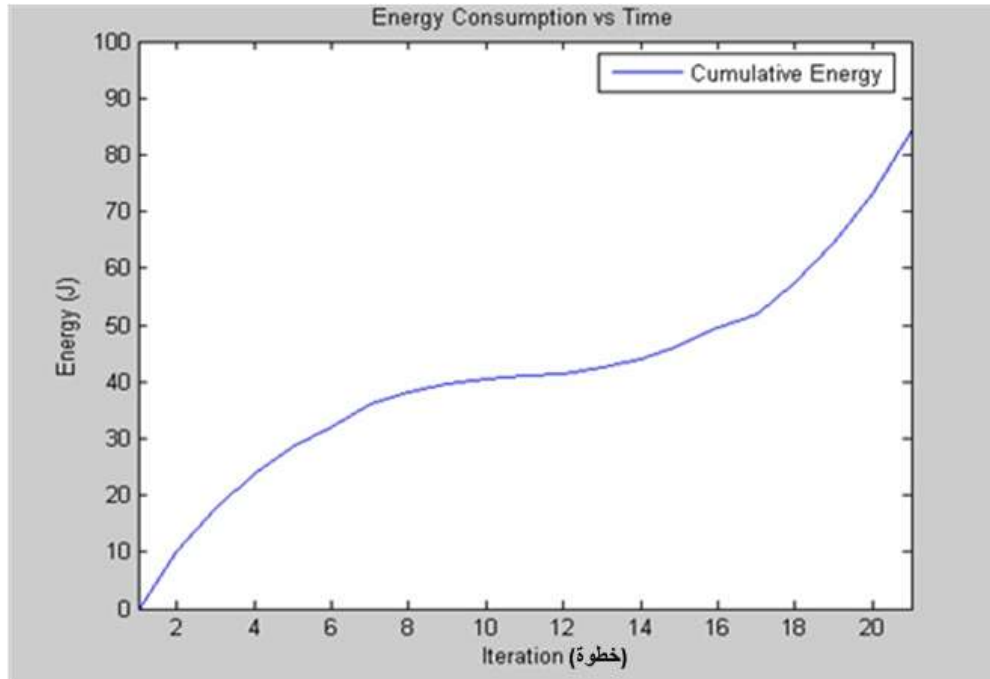
الشكل (17) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مثلثي شاقولي (Case 2)

2.2. حالة مسار بشكل مربع (case 2)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال تبلغ قيمتها (1000 mm) و زمن للانتقال على كامل المسار (4.2 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (18) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي. كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (19) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (84.23 J).



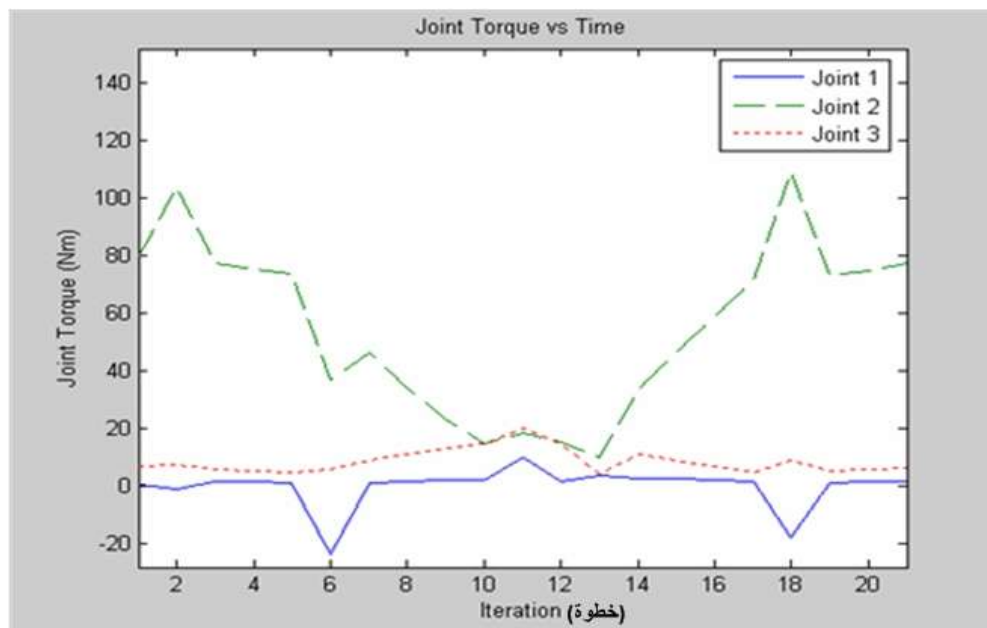
الشكل (18) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مربع شاقولي (Case 2)



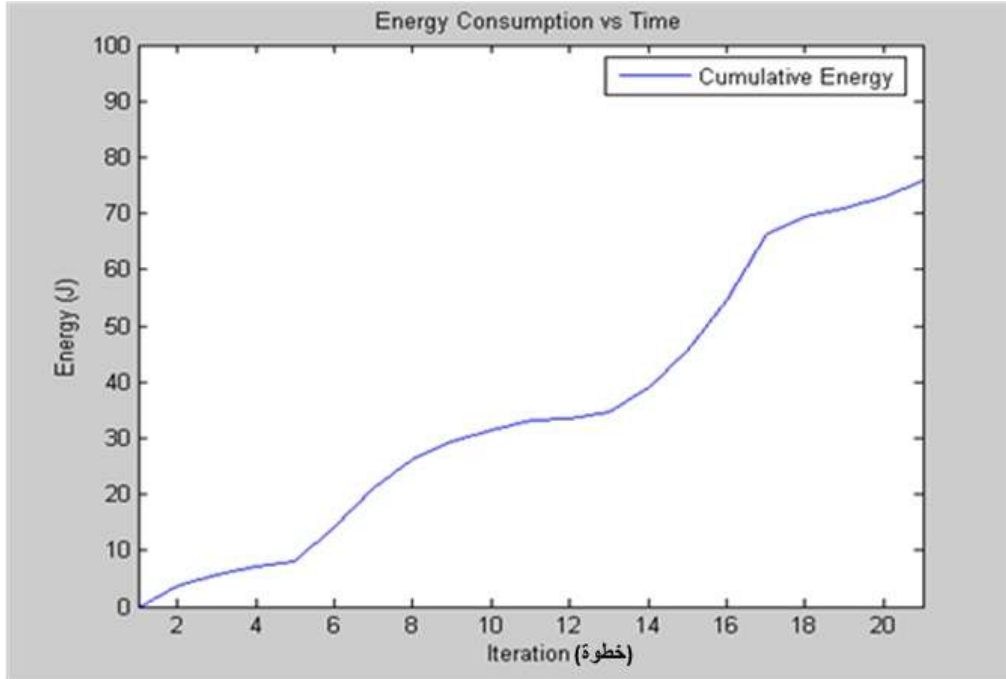
الشكل (19) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مربع شاقولي (Case 2)

3.2. حالة مسار بشكل مستطيل (case 2)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال تبلغ قيمتها (1000 mm) و زمن للانتقال على كامل المسار (4.3 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (20) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي. كما بين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (21) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (75.78 J).



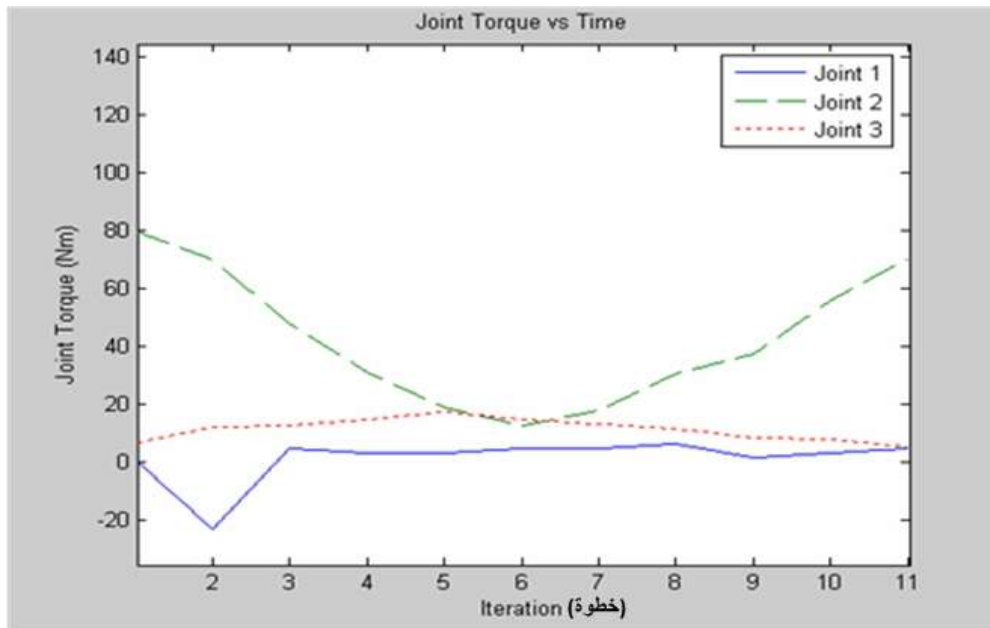
الشكل (20) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل مستطيل شاقولي (Case 2)



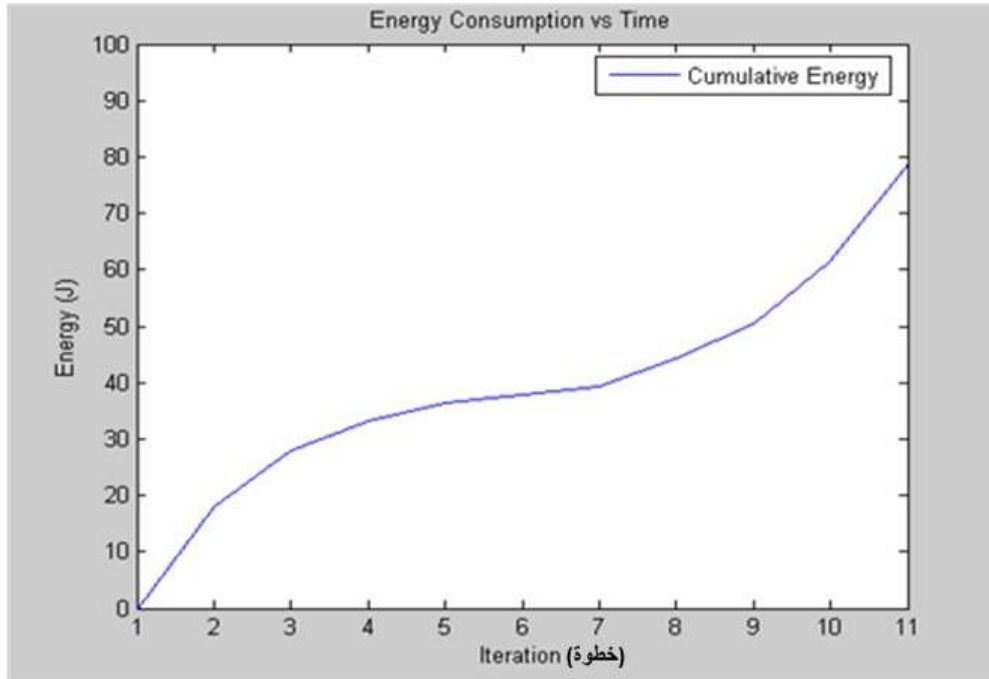
الشكل (21) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل مستطيل شاقولي (Case 2)

2.4. حالة مسار بشكل نصف دائري (case 2)

يمتلك هذا المسار مسافة انتقال تبلغ قيمتها (785 mm) و زمن للانتقال على كامل المسار (2.5 Sec). كما يبين مخطط العزم - الزمن الموضح بالشكل (22) وجود قمم في بداية المسار وعند نقاط الانعطاف، بالإضافة إلى تعرض المفصل الثاني لعزوم أكبر من بقية المفاصل على طول المسار كونه يحمل ثقل الوصلة الثانية والثالثة للذراع الآلي. كما يبين مخطط الطاقة - الزمن المبين بالشكل (23) أن قيمة الطاقة اللازمة لإنجاز هذا المسار هي (78.80 J).



الشكل (22) عزوم المفاصل بحالة المسار بشكل نصف دائري شاقولي (Case 2)



الشكل (23) الطاقة المستهلكة بحالة المسار بشكل نصف دائري شاقولي (Case 2)

من دراسة المسارات الشاقولية يمكننا استنتاج النقاط التالية:

- ✓ بالرغم من أن هذا المسار بشكل مثلثي يعتبر من أفضل المسارات من حيث المستهلكة للطاقة بين المسارات المقترحة في حالة المسارات الأفقية بحيث بلغت قيمة الطاقة المستهلكة (70.49 J)، فإنها من أكثر المسارات المستهلكة للطاقة في حالة المسارات الشاقولية (83.94 J)، وهو ما يؤكد التأثير الكبير للجاذبية الأرضية على قيم العزوم في المفاصل والتي تؤثر بدورها على كمية الطاقة المستهلكة.
- ✓ في حالة المسارات الشاقولية، يعتبر المسار بشكل مستطيل أفضل المسارات من حيث استهلاك الطاقة.
- ✓ يظهر التأثير الكبير للجاذبية الأرضية خصوصا عند تحرك المفصل الثاني باتجاه الأعلى أو الأسفل، مما يسبب بظهور قمم في منحنى الطاقة تعبر عن قيم مرتفعة للعزم في هذا المفصل.
- ✓ بالنسبة إلى زمن الانتقال و مسافة الانتقال يبقى المسار بشكل مثلث الأفضل بين المسارات المقترحة.
- ✓ أما بالنسبة إلى عزوم المفاصل فإن المسار بشكل نصف دائري هو الأفضل كونه يتمتع بدرجة كبيرة من النعومة بالتالي لا توجد تغيرات مفاجئة باتجاه حركة الذراع الآلي، مما ينعكس على مخططات عزوم المفاصل فنلاحظ اختفاء جميع القمم في المخططات ما عدا أول قمة عند بدء حركة الذراع الآلي.

الاستنتاجات و التوصيات:

مما سبق يمكننا تلخيص النتائج في حالة المسارات الشاقولية و الأفقية وفق الجدول التالي:

الجدول (3) نتائج اختيار المسارات المقترحة من حيث زمن الانتقال و مسافة الانتقال و الطاقة المستهلكة

| شكل المسار | حالة المسار | زمن الانتقال (Sec) | مسافة الانتقال (mm) | الطاقة المستهلكة (J) |
|------------|-----------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| مثلثي | أفقي (case 1) | 2.4 | 707 | 70.49 |
| مربع | أفقي (case 1) | 4.2 | 1000 | 124.83 |
| مستطيل | أفقي (case 1) | 4.3 | 1000 | 93.81 |
| نصف دائري | أفقي (case 1) | 2.5 | 785 | 72.13 |
| مثلثي | شاقولي (case 2) | 2.4 | 707 | 83.94 |
| مربع | شاقولي (case 2) | 4.2 | 1000 | 84.23 |
| مستطيل | شاقولي (case 2) | 4.3 | 1000 | 75.78 |
| نصف دائري | شاقولي (case 2) | 2.5 | 785 | 78.80 |

تناول البحث دراسة مجموعة من المسارات لحركة الأذرع الآلية للانتقال من نقطة البداية إلى نقطة الهدف مع وجود عائق في منتصف المسار يمنع الحركة بشكل مستقيم بين نقطتي البداية والهدف. تم خلال البحث دراسة كل مسار مقترح وفق مستويين أفقي وشاقولي، ومن تم مقارنة النتائج كل على حدى من حيث مقدار الطاقة، زمن الانتقال و مسافة الانتقال.

يختلف تقييم المسارات المختبرة وفق متطلبات العمل و رغبة المصنع، فإذا كان زمن الانتقال له تأثير كبير على عملية الانتاج أو العملية المطلوب تنفيذها من الذراع الآلي يجب أن تنجز بأسرع شكل ممكن، فمن البديهي أن يتم اختيار المسار ذو أقل زمن انتقال، فمن ضمن المسارات المقترحة فإن المسار بشكل مثلثي و المسار بشكل نصف دائري يتميزان بأقل زمن انتقال و مسافة انتقال.

أما إذا كان الهدف الحفاظ قدر الإمكان على سلامة محركات الذراع الآلي فمن الضروري اختيار مسار ناعم قدر الإمكان لتجنب الصدمات الميكانيكية الناتجة عن القمم أو قيم مرتفعة في عزوم المفاصل، وهو ما يتميز به المسار بشكل نصف دائري.

أما إذا كان الهدف الأساسي انقاص كمية الطاقة المستهلكة فإن المسار بشكل مثلثي الأفقي يحقق هذا المطلب على الرغم من وجود تغيير وحيد مفاجئ في اتجاه الحركة، كما أنه يتمتع بأقل مسافة انتقال و زمن انتقال بين جميع المسارات المقترحة ضمن هذا البحث.

كما يمكننا ملاحظة قيم عزوم للمفصل الثاني أعظم منها في بقية المفاصل وذلك في جميع المسارات المختبرة وفي حالتها المسارات الأفقية والشاقولية، يمكن تفسير ذلك كون المفصل الثاني يتحمل وزن الوصلة الثانية والثالثة من الذراع الآلي بالإضافة إلى أن حركة هذا المفصل وشعاع الجاذبية الأرضية يقعان في مستو واحد، أي يكون تأثير الجاذبية على هذا المفصل أعظم من تأثيرها على بقية المفاصل في الذراع الآلي.

مما سبق يمكننا استنتاج مجموعة من النقاط العامة نتلخص بما يلي:

- ✓ المسار ذو أقل مسافة انتقال يتطلب زمن انتقال أقل واستهلاك أقل من الطاقة.
 - ✓ يجب قدر الامكان تجنب المسارات التي تمتلك تغيرات مفاجئة في اتجاه الحركة (المسار بشكل مستطيل) لأنها تعرض محركات الذراع الآلي إلى قيم عزوم مرتفعة.
- لا يمكن اعتبار النقاط السابقة صحيحة دوماً، إلا أنها تعتبر نقطة بداية لإيجاد المسار الأفضل لذراع آلي لأداء مهمة صناعية معينة.

المراجع:

- [1]. A. GASPARETTO, P. BOSCARIOL, A. LANZUTTI, R. VIDONI. Trajectory Planning in Robotics, Mathematics in Computer Science, Volume 6, Issue 3, Pages 269-279, 2012.
- [2]. P.J. BARRE, R. BEAREE, P. BORNE, E. DUMETZ. Influence of a jerk controlled movement law on the vibratory behaviour of high-dynamics systems, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Volume 42, Issue 3, Pages 275-93, 2005.
- [3]. R. VIDONI, N. LEVER, D. RICHIEDEI, A. GASPARELLA, A. TREVISANI, A. GASPARETTO. Energy Efficiency and smoothness in robotics trajectory planning: numerical simulation and comparison, Proc. of the Austrian Robotics Workshop (ARW 2013), Wien (Austria), May 23-24, 2013.
- [4]. C. HANSEN, J. KOTLARSKI, T. ORTMAIER. Experimental validation of advanced minimum energy robot trajectory optimization, Proc. of the IEEE 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR13), Montevideo, Uruguay, 25-29 Nov. 2013.
- [5]. K.D. NGUYEN, I-M. CHEN, T-C. NG. Planning Algorithms for S-curve Trajectories, Proc. of the 2007 IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics, Zurich, Switzerland, 4-7 Sept. 2007.
- [6]. J. SCHULTZ AND T. D. MURPHEY. Real-time trajectory generation for a planar crane using discrete mechanics. In Workshop on "Real-time Motion Generation & Control - Constraint-based Robot Programming" at the 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Chicago, IL, USA, Sep 2014. "<http://cs.stanford.edu/people/tkr/iros2014/proceedings.html>".
- [7]. T. KUNZ AND M. STILMAN. Probabilistically complete kinodynamic planning for robot manipulators with acceleration limits. In Proc. 2014 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 3713–3819, Chicago, IL, USA, Sep 2014.
- [8]. BOBROW, JAMES E. Optimal Robot Path Planning Using the Minimum-Time Criterion. IEEE Journal of Robotics and Automation 4.4 (1988): 443-50.
- [9]. CONSTANTINESCU, D. AND E.A. CROFT. Smooth and Time-Optimal Trajectory Planning for Industrial Manipulators along Specified Paths. Journal of Robotic Systems 17.5 (2000): 233-249.
- [10]. CRAIG, JOHN J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd ed. New Jersey: Pearson Prentice, 2005.
- [11]. DIKEN, HAMZA. Energy Efficient Sinusoidal Path Planning of Robot Manipulators. Mech. Mach. Theory 29.6 (1994): 785-92.

- [12]. FIELD, GLEN AND YURY STEPANENKO. Iterative Dynamic Programming: An Approach to Minimum Energy Trajectory Planning for Robotic Manipulators. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, 1996. 2755-2760.
- [13]. HOLLERBACH, JOHN M. Kinematics and Dynamics for Control. Robotics Science. Ed. Michael Brady. Cambridge: MIT Press, 1989. 378-431.
- [14]. MANSEUR, RACHID. Robot Modeling and Kinematics. Boston: Da Vinci, 2006.
- [15]. NAGURKA, MARK L. Newton-Euler Dynamics of Robots. Robotics and Automation Handbook. Ed. Thomas R. Kurfess. New York: CRC Press, 2005. 4.1 – 4.10.