مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (31) العدد (3) 2009
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (31) No. (3) 2009

النمذجة الرياضية لحركة وتحريك ذراع آلية رباعية درجة الحرية

الدكتور عيسى اسماعيل*
ميماس أحمد**

(تاريخ الإيداع 18 / 5 / 2009. قُبِل للنشر في 2009/8/18)

□ ملخّص □

أصبح للأذرع الآلية في الوقت الحالي تطبيقات عديدة في المعامل والمصانع، حيث تم استخدمها من أجل نقل وترتيب ومعالجة القطع والأدوات، وغيرها من المهام التي تتطلب كمية كبيرة من تكرار مثل هذه العمليات. وهذه العمليات تشمل سلسلة من الحركات التي تكون معرّفة ومحددة سابقاً.

تم في هذه البحث دراسة هذه السلسلة من الحركات التي تسمى الدراسة الكينماتيكية (دراسة الحركة بدون وجود قوى) بالإضافة إلى الدراسة الدينامكية (مع وجود قوى) لذراع آلية رباعية درجة الحرية (4DOF) مزودة بمفصلين دورانيين (2RR) ومفصلين انسحابيين(2PP)، كما تم إعداد برنامج لحساب القوى والسرع للمفاصل والوصلات.

الكلمات المفتاحية: نمذجة، ذراع آلية، دراسة ديناميكية، دراسة كينماتيكية، ذراع آلية رباعية درجة الحرية، قوى.

*مدرس – كلية الهندسة الميكانيكية – أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية – حلب - سورية
** طالب دراسات عليا (ماجستير)– كلية الهندسة الميكانيكية – أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية – حلب – سورية

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (31) العدد (3) 2009
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (31) No. (3) 2009

Modeling of mechanic study For 4 DoF Manipulator

Dr. Issa Esmaiel *
Mimas Ahmad **

(Received 18 / 5 / 2009. Accepted 18 / 8 / 2009)

□ ABSTRACT □

Manipulator has become at the present time many applications in the laboratories and factories where they were used for the transfer, the order and deal with the parts and tools, and other tasks that require a large amount of repetition of such operations. These include a series of movements that have specific knowledge of the past .

In this research study of this series of movements called Kinematic study (the study of movement without the presence of forces) in addition to the dynamic (with the presence of the forces) to the manipulator of a four-degree of freedom (4DOF) with two joints are rotational (2RR) and two joints are prismatic (2PP) .

Key words: Modeling, Manipulator, dynamic, Kinematic, 4DOF, forces.

* **Assistant Professor, Faculty Of mechanical Engineering, Al-Assad Academy For Military Engineering, Aleppo ,Syria.**
****Postgraduate Student, Faculty Of mechanical Engineering , Al-Assad Academy For Military Engineering, Aleppo**

مقدمة:

تُعرَّف الذراع الآلية على أنها عبارة عن ميكانزم يتألف من مجموعة قطع موصولة مع بعضها عن طريق مفاصل انسحابية أو دورانية، وتتحرك هذه القطع بالنسبة لبعضها البعض، لكي تؤدي الوظيفة المطلوبة [1]. إن معرفة المهمة الأساسية للذراع تحدد البنية الصلبة لها، حيث يتم تحديد تسلسل الحركات التي ستقوم بها، وبالتالي تتحدد: عدد الوصلات التي ستدخل في التصميم وطريقة توضعها بالنسبة لبعضها البعض، وكذلك عدد المحركات المطلوبة لتحريك هذه الوصلات بما يضمن تنفيذ المهمة المطلوبة من هذه الذراع [2].

يتم قيادة بعض الأذرع الآلية بواسطة الحاسب عن طريق برنامج يتضمن سلسلة الحركات المطلوب تنفيذها من الذراع، إضافةً إلى اتخاذ بعض القرارات البسيطة دون تدخل الإنسان[3].

يوجد أيضاً بعض الأنواع من الأذرع الآلية التي يتم التحكم بها عن بعد عن طريق الإنسان عند العمل تحت الظروف الصعبة مثل: الأماكن السامة والمشعة، الأماكن الحارة والباردة جداً، وكذلك الأماكن ذات الضغط العالي التي لا يستطيع الإنسان تحملها.

أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية البحث في معرفة موضع ودوران كل مفصل من مفاصل الذراع الآلية بالنسبة إلى جملة إحداثيات مرجعية من خلال الدراسة الكينماتيكية، وكذلك في معرفة القوى المؤثرة عليها وعلى أجزائها عن طريق الدراسة الديناميكية.

طرائق البحث ومواده:

أُعتمدت في هذا البحث من أجل النمذجة الرياضية للدراسة الميكانيكية للذراع الآلية المنهجية التالية:

- بنية الذراع الآلية.
- الدراسة الكينماتيكية.
- حساب القوى الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية.
- الدراسة الديناميكية .
- المحاكاة الحاسوبية.
- النتائج والمناقشة.

بنية الذراع الآلية:

تتكون الذراع من وصلات مرتبطة مع بعضها البعض بمفاصل، وكل مفصل من هذه المفاصل يملك درجة حرية واحدة سواء كانت دورانية حول إحدى المحاور (X, Y, Z) أو انسحابية بإحدى الإتجاهات (X, Y, Z) حيث من النادر أن يتم بناء أذرع آلية بمفاصل تملك أكثر من درجة حرية واحدة ، في حال كان إحدى المفاصل يملك أكثر من درجة حرية واحدة على سبيل المثال n درجة حرية (n=2.....6) في هذه الحالة يمكن توصيفها بـ n مفصل أحادي درجة الحرية موصولة مع بعضها بـ (n-1) وصلة طول كل منها يساوي الصفر.

يمكن اعتبارالوصلة على أنها قطعة صلبة تتميز بثوابتها الحركية والديناميكية. تُمثِّل الثوابت الحركية للوصلة بالطول (a) والزاوية (α) بين محوري نهايتيها، بينما تُمثِّل الثوابت الديناميكية للوصلة بالكتلة (m) وموقع مركز الثقل (*l*) وعزم العطالة (I) . يبين الشكل (1) ذراع آلية تتألف من أربعة مفاصل، كل مفصل من هذه المفاصل تملك درجة حرية واحدة:

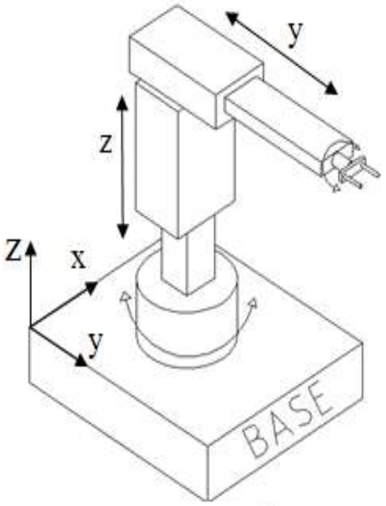
1- مفصل دوراني حيث يتم الدوران حول المحور Z .

2- مفصل انسحابي باتجاه المحور Z .

3- مفصل انسحابي باتجاه المحور Y .

4- مفصل دوراني حول المحور Y .

بما أن محاور دوران المفاصل الدوارنية مختلفة، ومحاور انسحاب المفاصل الأنسحابية أيضاً مختلفة، بالتالي الذراع تملك أربع درجات من الحرية.



الشكل (1) ذراع آلية رباعية درجة الحرية

الدراسة الكينماتيكية:

الكينماتيك هو العلم الذي يدرس الحركة دون اللجوء إلى القوى المؤثرة عليها أو المسبَّبة لها [4]. يوجد الآن طريقتان لإجراء الدراسة الكينماتيكية:

1- الطريقة المباشرة : تتضمن إيجاد موضع نهاية الذراع (المقبض) اعتماداً على معرفة طول كل وصلة وزاوية دوران كل مفصل .

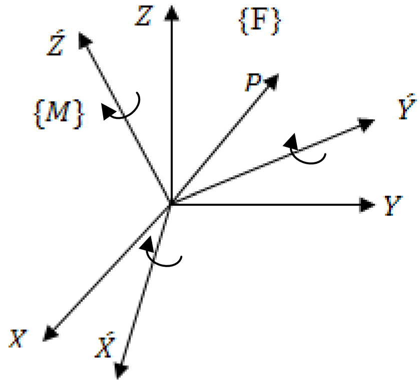
2- الطريقة العكسية : تتضمن إيجاد زاوية دوران كل مفصل اعتماداً على معرفة طول كل وصلة وموضع نهاية الذراع المطلوب تواجدها فيه .

سيتم في هذه الفقرة إجراء الدراسة الكينماتيكية بالطريقة المباشرة ، حيث يتم تبيان كيفية حساب الموضع والدوران لنهاية الذراع كتابع لمتغيرات المفاصل .

إن أي نقطة في الفراغ يمكن تمثيلها بالنسبة إلى جملة إحداثيات ديكارتية {x,y,z} بشعاع P يمكن التعبير عنه بالشكل : $P =\{ P_x , P_y , P_z \}$

حيث أن: P_x , P_y , P_z مساقط الشعاع P على كل من المحاور X,Y,Z بالترتيب.

يبين الشكل (2) جملة الإحداثيات الثابتة {F} وجملة الإحداثيات {M} المتحركة حركة دورانية حول المحاور (X, Y, Z) حيث أن للجملتين مركزاً مشتركاً بالتالي الحركة الانسحابية للجملة {M} بالنسبة للجملة {F} معدومة .



الشكل(2) دوران جملة إحداثيات متحركة بالنسبة لجملة ثابتة.

إن مركبات الشعاع P بالنسبة إلى جملة الإحداثيات {F} هي:

$$\vec{P} = P_x\vec{X} + P_y\vec{Y} + P_z\vec{Z} \qquad (1)$$

وكذلك بالنسبة للجملة {M}:

$$\vec{P} = \acute{P}_x\vec{\acute{X}} + \acute{P}_y\vec{\acute{Y}} + \acute{P}_z\vec{\acute{Z}} \qquad (2)$$

بمساواة العلاقتين (1) و (2) نحصل على :

$$P_x\vec{X} + P_y\vec{Y} + P_z\vec{Z} = \acute{P}_x\vec{\acute{X}} + \acute{P}_y\vec{\acute{Y}} + \acute{P}_z\vec{\acute{Z}} \qquad (3)$$

بضرب طرفي المعادلة (3) مرةً بالشعاع الواحدي $\vec{X}$ ومرة ثانية بالشعاع $\vec{Y}$ ومرة ثالثة بالشعاع $\vec{Z}$ يتم الحصول على العلاقات التالية:

$$P_x = \left(\vec{\acute{X}}.\vec{X}\right)\acute{P}_x + \left(\vec{\acute{Y}}.\vec{X}\right)\acute{P}_y + \left(\vec{\acute{Z}}.\vec{X}\right)\acute{P}_z \qquad (4)$$

$$P_y = \left(\vec{\acute{X}}.\vec{Y}\right)\acute{P}_x + \left(\vec{\acute{Y}}.\vec{Y}\right)\acute{P}_y + \left(\vec{\acute{Z}}.\vec{Y}\right)\acute{P}_z \qquad (5)$$

$$P_z = \left(\vec{\acute{X}}.\vec{Z}\right)\acute{P}_x + \left(\vec{\acute{Y}}.\vec{Z}\right)\acute{P}_y + \left(\vec{\acute{Z}}.\vec{Z}\right)\acute{P}_z \qquad (6)$$

يمكن دمج المعادلات (4,5,6) بمعادلة واحدة على الشكل التالي :

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = [R_M^F].\begin{pmatrix} \acute{P}_x \\ \acute{P}_y \\ \acute{P}_z \end{pmatrix} \qquad (7)$$

حيث أن: $[R_M^F]$ تمثِّل الصيغة العامة لمصفوفة دوران جملة الإحداثيات {M} المتحركة بالنسبة لجملة الإحداثيات الثابتة {F} وتعرَف على الشكل التالي:

$$[R_M^F] = \begin{pmatrix} \vec{\acute{X}}.\vec{X} & \vec{\acute{Y}}.\vec{X} & \vec{\acute{Z}}.\vec{X} \\ \vec{\acute{X}}.\vec{Y} & \vec{\acute{Y}}.\vec{Y} & \vec{\acute{Z}}.\vec{Y} \\ \vec{\acute{X}}.\vec{Z} & \vec{\acute{Y}}.\vec{Z} & \vec{\acute{Z}}.\vec{Z} \end{pmatrix} \qquad (8)$$

فعلى سبيل المثال، إذا كان الدوران حول المحور (Z) بمقدار زاوية (α)، فان مصفوفة الدوران $[R_M^F]$ تأخذ الشكل التالي :

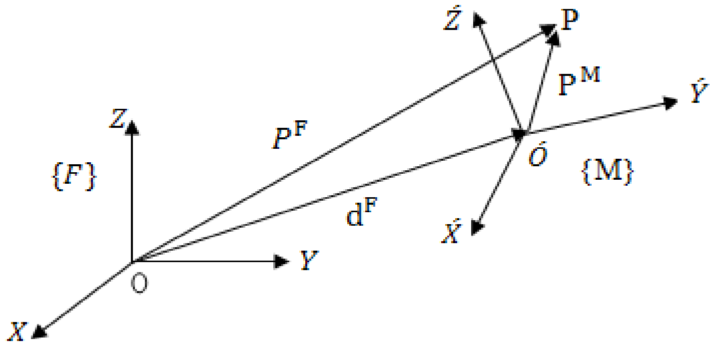
$$R_M^F(Z,\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (9)$$

وبنفس الطريقة يتم الحصول على مصفوفات الدوران حول المحاور (X) ، (Y) .

يمكن وصف النقطة P كما في الشكل (3) بالنسبة إلى الجملة {F} بالعلاقة التالية:

$$P^F = R_M^F . P^M + d^F \qquad (10)$$

d^F : مقدار انزياح مركز الجملة {M} عن مركز الجملة {F} .



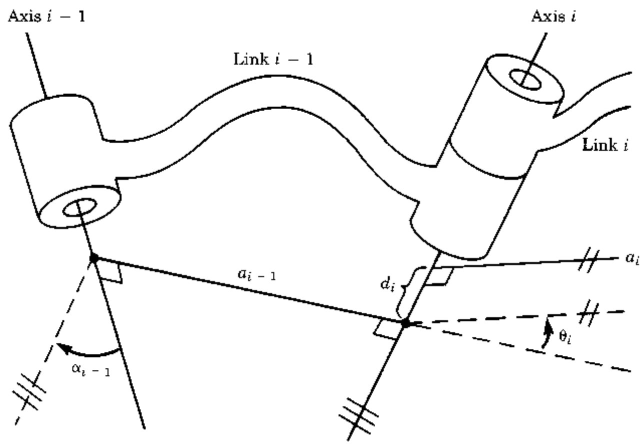
الشكل(3) انسحاب ودوران جملة إحداثيات متحركة بالنسبة لجملة ثابتة.

من أجل الحصول على مصفوفة التحويل المتجانسة التي تصف موضع ودوران مقبض الذراع الآلية بالنسبة للقاعدة، يجب إيجاد قيم البارمترات الأربعة لكل وصلة التي تسمى ببارمترات دينيفيد – هارتينبيرغ (D-H) [5]، اثنان من هذه البارمترات يصفان الوصلة نفسها والبارامتران الآخران يصفان توصيل الوصلة مع المفصلين اللذين يحددانها .

❖ البارمترات التي تصف توصيل الوصلة الموضحة في الشكل (4) هي:

1– طول الوصلة a_{i-1} : يساوي طول العمود المشترك بين محوري المفصلين اللذين يحددان الوصلة (i-1).

2– زاوية الفتل α_{i-1} : هي الزاوية الكائنة بين محوري المفصلين اللذين يحددان الوصلة (i-1) عند إسقاطهما على المستوي الناظمي على العمود المشترك بينهما، ويتم قياسها حسب قاعدة اليد اليمنى من الوصلة (i-1) إلى الوصلة (i) حول الناظم a_{i-1} .



الشكل (4) بارمترات (D-H) التي تصف الوصلة (i-1).

❖ البارمترات التي تصف الوصلة نفسها موضَّحة أيضاً في الشكل (4) وهي:

1- انزياح الوصلة d_i : هي المسافة على طول المحور المشترك من وصلة إلى أخرى، و تكون هذه المسافة متغيرة إذا كان المفصل انسحابياً، في حين تكون ثابتة إذا كان المفصل دورانياً.

2- زاوية المفصل θ_i : هي عبارة عن قيمة زاوية الدوران حول المحور المشترك للوصلتين، وتكون هذه الزاوية ثابتة، إذا كان المفصل انسحابياً، في حين تكون متغيرة إذا كان المفصل دورانياً .

من أجل الحصول على هذه البارمترات بشكل صحيح يجب إتباع عدة خطوات توضح طريقة توضُّع جمل الإحداثيات لكل مفصل، وهذه الخطوات هي:

1- نسب كل مفصل من مفاصل الذراع الآلية إلى جملة إحداثيات، بحيث يكون المحور Z هو محور التوجيه (محور الدوران أو محور الانسحاب).

2- تحديد قيمة الزاوية θ_i عن طريق تدوير المحور X_{i-1} حول المحور Z_i ليكون موازياً للمحور X_i وبنفس اتجاهه.

3 – تحديد قيمة الزاوية α_{i-1} عن طريق تدوير المحور Z_{i-1} حول المحور X_{i-1} ليكون موازياً للمحور Z_i وبنفس اتجاهه.

4- حساب طول الوصلة a_{i-1} المسافة بين المحور Z_{i-1} والمحور Z_i مقاسة على طول المحور X_{i-1} .

5- حساب مسافة الانزياح d_i على أنها المسافة بين المحور X_{i-1} والمحور X_i مقاسة على طول المحور Z_i.

بعد حساب قيم بارمترات دينيفيد – هارتينبيرغ D-H يتم الحصول على مصفوفة التحويل المتجانسة التي تصف انسحاب ودوران جملة إحداثيات المفصل (i) بالنسبة إلى جملة احداثيات المفصل (i-1) على الشكل التالي :

$$T_{\mathrm{i}}^{\mathrm{i}-1}=\begin{pmatrix} & \mathrm{U_i} & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & \mathrm{d_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} & \mathrm{V_i} & & \mathrm{a_i} \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \mathrm{U_iV_i} & \mathrm{U_i}S_{\mathrm{i}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (11)$$

حيث أن:

U_{i}: مصفوفة الدوران حول المحور Z بمقدار الزاوية θ_i .

V_i: مصفوفة الدوران حول المحور X بمقدار الزاوية α_{i-1} .

S_i: مصفوفة الانسحاب باتجاه المحور X بالمقدار a_{i-1} وباتجاه المحور Z بالمقدار d_i والتي تكتب بالشكل التالي:

$$S_i = \begin{pmatrix} a_{i-1} \\ 0 \\ d_i \end{pmatrix} \quad (12)$$

تصبح بالنتيجة مصفوفة التحويل المتجانسة التي تصف انسحاب ودوران جملة إحداثيات المفصل (n) بالنسبة إلى جملة إحداثيات القاعدة على الشكل التالي:

$$ {}^{0}_{n}T = {}^{0}_{1}T.{}^{1}_{2}T \ldots . {}^{n-1}_{n}T = \begin{pmatrix} {}^{0}_{n}R & d^{0}_{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

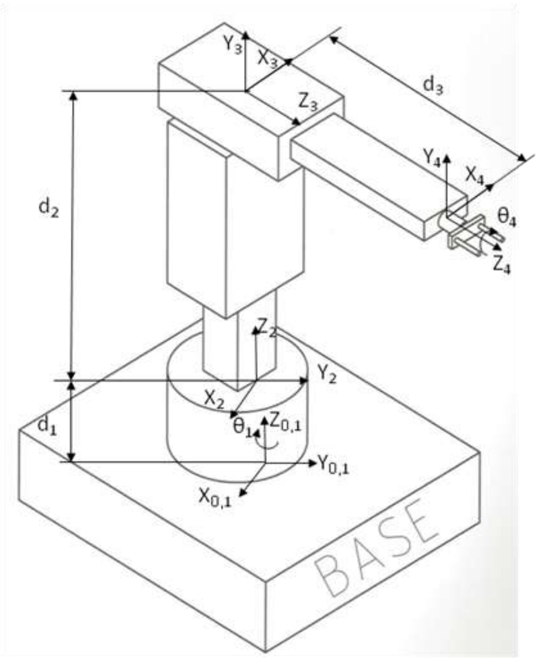
حيث أن:

$$ {}^{0}_{n}R = (U_1V_1)(U_2V_2) \ldots \ldots (U_nV_n) \quad (14)$$

$$ d^{0}_{n} = U_1S_1 + U_1V_1U_2S_2 + \cdots U_1V_1U_2V_2 \ldots U_{n-1}V_{n-1}U_nS_n \quad (15)$$

يوضح الشكل (5) المخطط التفصيلي لذراع آلية رباعية درجة الحرية الموضحة في الشكل (1)، والتي تملك حركتين دورانيتين حول كل من المحاور (Y, Z) وحركتين انسحابيتين باتجاه المحاور (Y, Z) بالتالي هذه الذراع تفقد الحرية بالحركة الدورانية والانسحابية بالنسبة للمحور (X) .

تم توضُّع الجمل الإحداثية لكل مفصل من مفاصل الذراع اعتماداً على الخطوات التي تم ذكرها سابقاً من أجل الحصول على القيم النظامية لبارمترات D-H .



الشكل (5) المخطط التفصيلي لذراع آلية رباعية درجة الحرية

يُلاحظ من الشكل أن جملة إحداثيات القاعدة هي نفسها جملة إحداثيات المفصل (1) الذي يملك قيمة زاوية دوران متغيرة (θ_1) ، ومسافة ثابتة بين مركزي جملتي إحداثيات المفصلين (1, 2) قدرها (d_1) ، أما المسافة (d_2) التي

تمثل مقدار انسحاب المفصل (2) فتكون متغيرة، وبشكل مماثل تعتبر القيمة (d_3) للمفصل (3) قيمة متغيرة، وكذلك فإن زاوية الدوران (θ_4) حول المحور (z_3) قيمة متغيرة أيضاً.

الجدول(1): يبين بارمترات D-H لذراع آلية رباعية درجة الحرية

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	0	d_1	0
3	270°	0	d_2	0
4	0	0	d_3	θ_4

بالاعتماد على العلاقة (13) يتم حساب مركبات مصفوفة التحويل T_4^0 كالتالي:

❖ حساب مصفوفة الدوران ${}_4^0R$:

$${}_4^0R = (U_1V_1)(U_2V_2)(U_3V_3)(U_4V_4) \qquad (16)$$

بالاعتماد على الجدول (1) يتم الحصول على مركبات المصفوفة (16):

$$V_1 = V_2 = V_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ، \qquad V_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$U_2 = U_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ، \qquad U_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_4 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

بالتعويض في المعادلة (16) يتم الحصول على الشكل النهائي للمصفوفة ${}_4^0R$:

$${}_4^0R = \begin{pmatrix} -\cos(\theta_1)\cos(\theta_4) & \sin(\theta_4)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \\ -\sin(\theta_1)\cos(\theta_4) & \sin(\theta_1)\sin(\theta_4) & \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 \end{pmatrix} \qquad (17)$$

❖ حساب مصفوفة الانسحاب d_4^0 :

$$d_4^0 = U_1S_1 + U_1V_1U_2S_2 + U_1V_1U_2V_2U_3S_3 + U_1V_1U_2V_2U_3V_3U_4S_4 \qquad (18)$$

بالاعتماد على الجدول (1) يتم الحصول على مركبات المصفوفة (18):

$$S_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} ,S_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{pmatrix} ,\ S_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_2 \end{pmatrix} ,\ S_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_3 \end{pmatrix}$$

بتطبيق العلاقة (18) نحصل على :

$$d_4^0 = \begin{pmatrix} -d_3\sin(\theta_1) \\ d_3\cos(\theta_1) \\ d_1 + d_2 \end{pmatrix} \qquad (19)$$

بتعويض المعادلتين (19) و (17) في المعادلة (13) تصبح مصفوفة التحويل المتجانسة ${}^{0}_{4}T$ على الشكل التالي:

$$
{}^{0}_{4}T=\begin{pmatrix}-c_1c_4 & s_4c_1 & -s_1 & -d_3s_1\\ -s_1c_4 & s_1s_4 & c_1 & d_3c_1\\ s_4 & c_4 & 0 & d_1+d_2\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{pmatrix} \qquad (20)
$$

حيث أن :

$$c_1=\cos(\theta_1)\ ,s_1=\sin(\theta_1)\ ,\ s_4=\sin(\theta_4)\ ,c_4=\ \cos(\theta_4)$$

حساب سرعة وصلات الذراع الآلية:

سيتم في هذه الفقرة حساب السرعة الخطية والزاوية لكلٍ من وصلات الذراع الآلية [6] حيث يتم افتراض :

v_i: السرعة الخطية لمركز جملة إحداثيات الوصلة {i}.

w_i : السرعة الزاوية لجملة إحداثيات الوصلة {i}.

إن السرعة الزاوية للوصلة (i+1) تساوي إلى سرعة الوصلة (i) مضافاً إليها مركبة السرعة الزاوية الناتجة عن دوران المفصل (i+1)، ويمكن كتابتها بالنسبة إلى جملة الإحداثيات {i} كالتالي:

$$ {}^{i}w_{i+1}=\ {}^{i}w_i+{}_{i+1}^{\ \ i}R.\dot{\theta}_{i+1}\vec{Z} \qquad (21)$$

حيث أن: ${}_{i+1}^{\ \ i}R$ مصفوفة دوران المفصل (i+1) بالنسبة للمفصل (i).

$\dot{\theta}_{i+1}$: مركبة السرعة الزاوية للمفصل (i+1) وتعطى بالعلاقة التالية :

$$\dot{\theta}_{i+1}\vec{Z}\ =\begin{pmatrix}0\\0\\\dot{\theta}_{i+1}\end{pmatrix} \qquad (22)$$

بضرب طرفي المعادلة (21) بمصفوفة الدوران ${}^{i+1}_{\ \ i}R$ فتصبح النتيجة كالتالي:

$$ {}^{i+1}w_{i+1}={}^{i+1}_{\ \ i}R\ {}^{i}w_i+\dot{\theta}_{i+1}\vec{Z} \qquad (23)$$

حيث أن ${}^{i+1}w_{i+1}$ السرعة الزاوية للوصلة (i+1) وهي موصَّفة بالنسبة إلى جملتها الإحداثية .

أما السرعة الخطية للوصلة (i+1) فتساوي إلى سرعة الوصلة (i) مضافاً إليها مركبة جديدة ناتجة عن السرعة الزاوية للوصلة (i)، ويمكن كتابتها بالنسبة إلى جملة الإحداثيات {i} كالتالي:

$$ {}^{i}v_{i+1}=\ {}^{i}v_i+\ {}^{i}w_i\times\ {}^{i}P_{i+1} \qquad (24)$$

${}^{i}P_{i+1}$: المسافة (شعاع الانسحاب) بين مركزي جملتي الإحداثيات {i}،{i+1}.

بضرب طرفي المعادلة (24) بمصفوفة الدوران ${}^{i+1}_{\ \ i}R$ يتم الحصول على السرعة الخطية للمفصل (i+1) بالنسبة إلى جملة إحداثياتها وفق العلاقة التالية :

$$ {}^{i+1}v_{i+1}={}^{i+1}_{\ \ i}R(\ {}^{i}v_i+\ {}^{i}w_i\times\ {}^{i}P_{i+1}) \qquad (25)$$

المعادلتان (23) ، (25) تعبران عن السرعة الخطية والسرعة الزاوية للمفصل الدوراني (i+1).

في حال كان المفصل (i+1) انسحابياً تصبح المعادلتان (23,25) على الشكل التالي:

$$ {}^{i+1}w_{i+1}={}^{i+1}_{\ \ i}R\ {}^{i}w_i \qquad (26)$$

$$ {}^{i+1}v_{i+1}={}^{i+1}_{\ \ i}R(\ {}^{i}v_i+\ {}^{i}w_i\times\ {}^{i}P_{i+1})+\dot{d}_{i+1}\vec{Z} \qquad (27)$$

اعتماداً على ما سبق يمكن الحصول على المعادلات التي تصف سرعة حركة وصلات الذراع الآلية المبينة في الشكل (5) بالنسبة إلى جملة إحداثيات كل وصلة بالشكل التالي :

$$ {}^{1}v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad , \quad {}^{1}w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} \tag{28} $$

$$ {}^{2}v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_2 \end{pmatrix} \quad , \quad {}^{2}w_2 = {}^{1}w_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix} \tag{29} $$

$$ {}^{3}v_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{d}_2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} \; , \; {}^{3}w_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{30} $$

$$ {}^{4}v_4 = \begin{pmatrix} c_4 & s_4 & 0 \\ -s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} d_3 . \dot{\theta}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_4 d_3 . \dot{\theta}_1 + \dot{d}_2 s_4 \\ -s_4 d_3 . \dot{\theta}_1 + \dot{d}_2 c_4 \\ \dot{d}_3 \end{pmatrix} \; , $$

$$ {}^{4}w_4 = \begin{pmatrix} s_4 \dot{\theta}_1 \\ c_4 \dot{\theta}_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_4 \dot{\theta}_1 \\ c_4 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} \tag{31} $$

حساب القوى الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية:

تقود طبيعة التوصيل بين وصلات الذراع الآلية إلى :

- دراسة كيفية تأثير القَّوى والعزوم وانتقالها من وصلة إلى أخرى.
- حساب عزوم المفاصل المطلوبة للمحافظة على التوازن الستاتيكي للذراع الآلية .

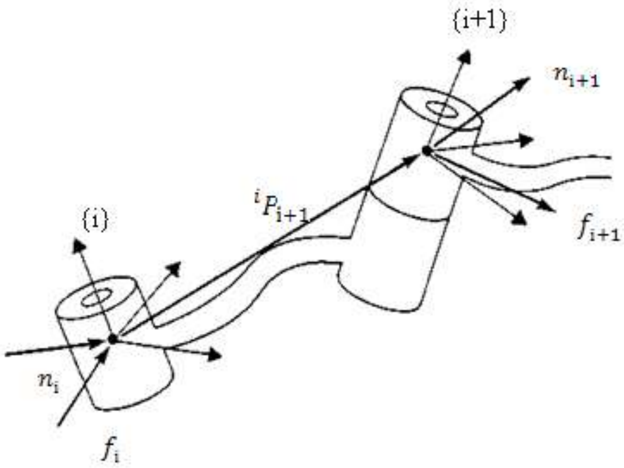
يبين الشكل (6) القوى والعزوم الستاتيكية المطبقة على الوصلة (i) . من شرط توازن القوى على الوصلة يجب أن يكون مجموع القوى المؤثرة عليها مساوياً للصفر ويكتب على الشكل التالي:

$$ {}^{i}f_i - {}^{i}f_{i+1} = 0 \tag{32} $$

حيث أن :

${}^{i}f_{i+1}$: القوة المطبقة على الوصلة (i+1) من قبل الوصلة (i).

${}^{i}f_i$: القوة المطبقة على الوصلة (i) من قبل الوصلة (i-1).



الشكل (6) القوى والعزوم الستاتيكية المطبقة على الوصلة (i).

من شرط توازن العزوم على الوصلة يجب أن يكون مجموع العزوم المؤثرة عليها مساوياً للصفر، ويكتب على الشكل التالي:

$$ {}^{i}n_{i} - {}^{i}n_{i+1} - {}^{i}P_{i+1} \times {}^{i}f_{i+1} = 0 \tag{33} $$

حيث أن :

${}^{i}n_{i+1}$: العزم المطبق على الوصلة (i+1) من قبل الوصلة (i).

${}^{i}n_{i}$: العزم المطبق على الوصلة (i) من قبل الوصلة (i-1).

يتم حساب القوى والعزوم المطبقة على كل وصلة ابتداءً من الوصلة الأخيرة وصولاً إلى القاعدة، بحيث تصبح العلاقتان (32) و (33) على الشكل التالي:

$$ {}^{i}f_{i} = {}^{i}f_{i+1} $$
$$ {}^{i}n_{i} = {}^{i}n_{i+1} + {}^{i}P_{i+1} \times {}^{i}f_{i+1} \tag{34} $$

بضرب طرفي المعادلات (34) بمصفوفة الدوران ${}^{i+1}_{\ \ i}R$ يتم الحصول على العلاقات التي تعبر عن القوى والعزوم المطبقة على كل وصلة بالنسبة إلى جملة إحداثياتها، حيث تصبح النتيجة كالتالي:

$$ {}^{i}f_{i} = {}^{i+1}_{\ \ i}R\, {}^{i+1}f_{i+1} \tag{35} $$
$$ {}^{i}n_{i} = {}^{i+1}_{\ \ i}R\, {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i}P_{i+1} \times {}^{i+1}f_{i+1} \tag{36} $$

لحساب القوى والعزوم الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية المبينة في الشكل (5) يتم تطبيق العلاقتين (35) و (36) على الشكل التالي :

$$ {}^{4}f_{4} = \begin{pmatrix} 0 \\ -f_y \\ 0 \end{pmatrix} ، \quad {}^{4}n_{4} = l_4 \vec{Z}_4 \times \begin{pmatrix} 0 \\ -f_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_4 f_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{37} $$

$$ {}^{3}f_{3} = \begin{pmatrix} -s_4 f_y \\ -c_4 f_y \\ 0 \end{pmatrix} \tag{38} $$

$$^{3}n_3 = \begin{pmatrix} c_4 l_4 f_y \\ -s_4 l_4 f_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -f_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (c_4 l_4 + d_3) f_y \\ -s_4 l_4 f_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$^{2}f_2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -s_4 f_y \\ -c_4 f_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_4 f_y \\ 0 \\ -c_4 f_y \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$^{2}n_2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (c_4 l_4 + d_3) f_y \\ -s_4 l_4 f_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} s_4 f_y \\ 0 \\ -c_4 f_y \end{pmatrix}$$

$$^{2}n_2 = \begin{pmatrix} -(c_4 l_4 + d_3) f_y \\ d_2 s_4 f_y \\ -s_4 l_4 f_y \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$^{1}f_1 = \begin{pmatrix} s_4 f_y \\ 0 \\ -c_4 f_y \end{pmatrix} \quad (42)$$

$$^{1}n_1 = \begin{pmatrix} -(c_4 l_4 + d_3) f_y \\ d_2 s_4 f_y \\ -s_4 l_4 f_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} s_4 f_y \\ 0 \\ -c_4 f_y \end{pmatrix}$$

$$^{1}n_1 = \begin{pmatrix} -(c_4 l_4 + d_3) f_y \\ (d_2 s_4 + d_1 s_4) f_y \\ -s_4 l_4 f_y \end{pmatrix} \quad (43)$$

من المعادلات السابقة يتبين أن المفصل الرابع يتعرض إلى عزوم مطبقة حول المحور (X) فقط، بينما يتعرض المفصل الثالث إلى عزوم مطبقة حول المحورين (X،y)، أما المفصلان، الأول والثاني فيتعرضان إلى عزوم مطبقة حولَ كل من المحاور (X,Y,Z) .

الدراسة الديناميكية:

يوجد طريقتان للحصول على المعادلات الديناميكية لحركة الذراع الآلية [7]:

أولاً : طريقة نيوتن – أويلر التي تعتمد على إيجاد المعادلات الحركية لكل وصلة من وصلات الذراع، بشكل مستقل بحيث تصف الحركات الخطية والزاوية لها إضافةً إلى أنها تمكّن من حساب القوى والعزوم المؤثرة عليها من قبل الوصلات المتجاورة .

ثانياً : طريقة لاغرانج التي تعتمد على الفرق بين مجموع الطاقة الكامنة ومجموع الطاقة الحركية لوصلات الذارع الآلية، بحيث تقود بالنتيجة إلى الحصول على عزوم مفاصل الذراع الآلية .

سيتم في هذا البحث استخدام طريقة لاغرانج التي ستكون مختصرة ومحددة لحالة سلسلة من الوصلات المكّونة للذراع الآلية وفق التالي :

❖ يتم تحديد الصيغة العامة للطاقة الحركية k_i للوصلة (i) بالعلاقة التالية:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i . v_{c_i}{}^2 + \frac{1}{2}\, {}^{c_i}I_i .\ {}^{i}w_i{}^2 \quad (44)$$

حيث أن :

$\frac{1}{2}m_i.{v_{c_i}}^2$: الطاقة الحركية الناتجة عن السرعة الخطية لمركز كتلة الوصلة.

$\frac{1}{2}\,{}^{c_i}I_i.\ {}^{i}{w_i}^2$: الطاقة الحركية الناتجة عن السرعة الزاوية للوصلة.

الطاقة الحركية الكلية للذراع الآلية هي عبارة عن مجموع الطاقات الحركية لجميع الوصلات وتساوي :

$$k = \sum_{i=1}^{n} k_i \qquad (45)$$

من الفقرة (6) يتبين أن v_{c_i} ، ${}^{i}w_i$ تابعة لـ $(\dot{\theta}, \theta)$ ، وبالتالي يمكن أن توصف الطاقة الحركية للذراع الآلية كتابع لموضع وسرعة المفصل $k(\theta, \dot{\theta})$.

❖ يتم تحديد الطاقة الكامنة u_i للوصلة (i) بالشكل التالي :

$$u_i = m_i\ {}^{0}g.\ {}^{0}P_{c_i} \qquad (46)$$

حيث أن :

m_i : كتلة الوصلة (i).

${}^{0}g$: شعاع يمثل مركبة الجاذبية الأرضية ويوصف بمصفوفة(3×1).

${}^{0}P_{c_i}$: شعاع توضع مركز كتلة الوصلة (i) وهو تابع لمتغيرات المفصل، وبالتالي يمكن وصف الطاقة الكامنة للذراع الآلية على شكل علاقة تكون تابعة لمتغيرات المفصل $u(\theta)$.

الطاقة الكامنة الكلية للذراع الآلية هي عبارة عن مجموع الطاقات الكامنة لجميع الوصلات وتساوي :

$$u = \sum_{i=1}^{n} u_i \qquad (47)$$

الصيغة العامة لمعادلة لاغرانج للذراع الآلية تعطى، كما تمت الإشارة إليها سابقاً، بالشكل التالي:

$$\mathcal{L}(\theta, \dot{\theta}) = k(\theta, \dot{\theta}) - u(\theta) \qquad (48)$$

اعتماداً على الصيغة العامة لمعادلة لاغرانج يتم الحصول على عزوم المفاصل بالشكل التالي:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = \tau \qquad (49)$$

حيث أن (τ) هو شعاع (n×1) ويعبِّر عن عزوم محركات المفاصل التي عددها (n)، وبتعويض المعادلة (48) في المعادلة (49) تؤول هذه المعادلة إلى الشكل النهائي التالي:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial k}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial k}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = \tau \qquad (50)$$

اعتماداً على ما سبق يتم الحصول على المعادلات الديناميكية لحركة وصلات الذراع الآلية المبينة في الشكل (5) وفق التسلسل التالي:

❖ أولاً يتم حساب الطاقة الحركية لكل وصلة اعتماداً على العلاقة (44) .

- يقع مركز كتلة الوصلة الأولى على محور الدوران، وبالتالي فإن الطاقة الحركية الناتجة عن السرعة الخطية لها تساوي الصفر، أما الطاقة الحركية الناتجة عن السرعة الدورانية فتساوي إلى:

$$k_1 = \frac{1}{2} I_{zz1} \dot{\theta}_1^2 \qquad (51)$$

- أما مركز كتلة الوصلة الثانية فيتحرك حركة خطية بسرعة $\dot{d}_2$ وبالتالي الطاقة الحركية للوصلة الثانية تساوي إلى:

$$k_2 = \frac{1}{2} m_2 \dot{d}_2^2 + \frac{1}{2} I_{zz2} \dot{\theta}_1^2 \qquad (52)$$

حيث أن : d_2 هي مسافة انسحاب المفصل الثاني وهي قيمة متغيرة.

- يتم حساب الطاقة الحركية للوصلة الثالثة التي مركز كتلتها تبعد مسافة d_3 عن محور دوران المفصل الأول بشكل مشابه للوصلة الثانية، وبالتالي يعبَّر عن الطاقة الحركية للوصلة الثالثة بالشكل التالي:

$$k_3 = \frac{1}{2}m_3\left(\dot{d}_3^2 + \dot{d}_2^2 + d_3^2\dot{\theta}_1^2\right) + \frac{1}{2}\mathrm{I}_{yy3}\dot{\theta}_1^2 \qquad (53)$$

- تحسب الطاقة الحركية للوصلة الرابعة التي مركز كتلتها يبعد مسافة l_4 عن مركز إحداثيات الوصلة نفسها بالعلاقة التالية:

$$k_4 = \frac{1}{2}m_4\left(\dot{d}_3^2 + \dot{d}_2^2 + (l_4 + d_3)^2\dot{\theta}_1^2\right) + \frac{1}{2}\mathrm{I}_{yy4}\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}\mathrm{I}_{zz4}\dot{\theta}_4^2 \qquad (54)$$

اعتماداً على العلاقة (45) يتم الحصول على الطاقة الحركية الكلية للذراع التي تساوي:

$$k = \sum_{i=1}^{4} k_i$$

$$k = \frac{1}{2}\left(\mathrm{I}_{zz1} + \mathrm{I}_{zz2} + \mathrm{I}_{yy3} + \mathrm{I}_{yy4} + m_4(l_4 + d_3)^2 + m_3 d_3^2\right)\dot{\theta}_1^2$$
$$+\frac{1}{2}(m_2 + m_3 + m_4)\dot{d}_2^2 + \frac{1}{2}(m_3 + m_4)\dot{d}_3^2 + \frac{1}{2}\mathrm{I}_{zz4}\dot{\theta}_4^2 \qquad (55)$$

ثانياً يتم حساب الطاقة الكامنة لوصلات الذراع الآلية:

- يتم الحصول على الطاقة الكامنة لكل وصلة من وصلات الذراع الآلية بتطبيق العلاقة (46)، فالطاقة الكامنة للوصلة الأولى تساوي إلى:

$$u_1 = m_1 \mathrm{g} l_1 \qquad (56)$$

حيث أن : l_1 بعد مركز ثقل الوصلة الأولى عن القاعدة .

- بما أن الوصلتين الثالثة والرابعة تتوضعان بشكل عمودي على الوصلة الثانية، فإن الطاقة الكامنة لكلٍ منهما تختلف فقط بكتلة كل وصلة، لذلك تعطى الطاقة الكامنة لكل وصلة بالعلاقات :

$$u_2 = m_2\mathrm{g}(l_1 + d_1 + d_2) \qquad (57)$$
$$u_3 = m_3\mathrm{g}(l_1 + d_1 + d_2) \qquad (58)$$
$$u_4 = m_4\mathrm{g}(l_1 + d_1 + d_2) \qquad (59)$$

من العلاقة (47) يتم الحصول على معادلة الطاقة الحركية الكلية للذراع الآلية:

$$u = \sum_{i=1}^{4} u_i = \mathrm{g}(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)l_1$$
$$+\mathrm{g}(m_2 + m_3 + m_4)(d_1 + d_2) \qquad (60)$$

بعد إيجاد مجموع الطاقة الكامنة والطاقة الحركية، يتم السعي لإيجاد حدود العلاقة (50) على الشكل التالي:

$$\frac{\partial k}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} \left(\mathrm{I}_{zz1} + \mathrm{I}_{zz2} + \mathrm{I}_{yy3} + \mathrm{I}_{yy4} + m_4(l_4 + d_3)^2 + m_3 d_3^2\right)\ddot{\theta}_1 \\ (m_2 + m_3 + m_4)\ddot{d}_2 \\ (m_3 + m_4)\ddot{d}_3 \\ \mathrm{I}_{zz4}\ddot{\theta}_4 \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial k}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ d_3 m_3\dot{\theta}_1^2 + l_4 m_4\dot{\theta}_1^2 \\ 0 \end{pmatrix} ، \quad \frac{\partial u}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathrm{g}.m_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (61)$$

بتعويض مركبات العلاقة (61) $(\frac{\partial k}{\partial \theta})$ و $(\frac{\partial u}{\partial \theta})$ و $(\frac{\partial k}{\partial \theta})$ في العلاقة (*50*) يتم الحصول على العزوم المؤثرة على كل المفاصل والواجب تقديمها من المحركات و تساوي:

$$\tau_1 = \left(\mathrm{I_{zz1}} + \mathrm{I_{zz2}} + \mathrm{I_{yy3}} + \mathrm{I_{yy4}} + m_4(l_4 + d_3)^2 + m_3 d_3^2\right)\ddot{\theta}_1 \quad (62)$$

$$\tau_2 = (m_2 + m_3 + m_4)\ddot{d}_2 + \mathrm{g}.m_2 \quad (63)$$

$$\tau_3 = (m_3 + m_4)\ddot{d}_3 - d_3 m_3 \dot{\theta}_1^2 - l_4 m_4 \dot{\theta}_1^2 \quad (64)$$

$$\tau_4 = \mathrm{I_{zz4}}\ddot{\theta}_4 \quad (65)$$

المحاكاة الحاسوبية:

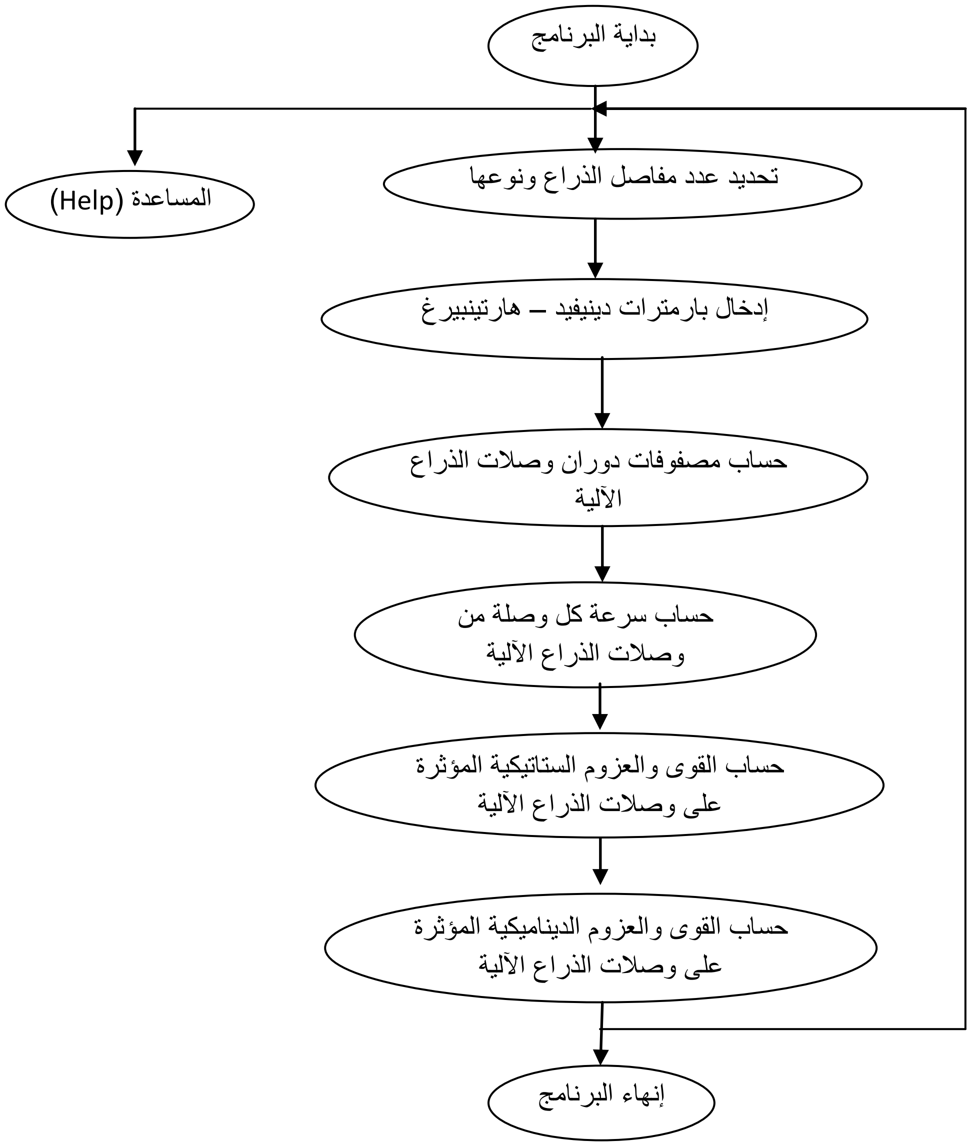
إن المحاكاة الحاسوبية للذراع الآلية هي تمثيل النموذج الرياضي له باستخدام الحاسوب، من أجل تنفيذ المحاكاة الحاسوبية للذراع الآلي تم إعداد البرامج اللازمة في البيئة البرمجية Matlab [8]. ومن هذه البرامج برنامج رئيسي يسمى demo.m حيث يقوم هذا البرنامج باستدعاء البرامج الفرعية التي تم تصميمها بالاعتماد على ما تقدم من الدراسة الكينماتيكة والديناميكية للذراع الآلي المدروس، وهذه البرامج هي:

1- برنامج حساب سرعة وصلات الذراع الآلية.

2- برنامج حساب القوى المؤثرة على وصلات الذراع الآلية.

3- برنامج حساب العزوم المؤثرة على وصلات الذراع الآلية.

الشكل التالي يوضح خوارزمية عمل البرنامج الحاسوبي:



الشكل (7) خوارزمية عمل البرنامج الحاسوبي

الشكل التالي يوضح الواجهة الرئيسة للبرنامج الحاسوبي الذي تم تصميمه باستخدام البيئة البرمجية Matlab:

الشكل (8) الواجهة الرئيسية للبرنامج الحاسوبي

يتم تشغيل هذا البرنامج وفق عدة مراحل هي:

المرحلة الأولى: في هذه المرحلة يتم تحديد عدد مفاصل الذراع الآلية (الحد الأعظمي 6 مفاصل)، بعد ذلك يتم تحديد نوع المفاصل المحددة وذلك باختيار الرمز (R) إذا كانت دورانية (Rotation) أو الرمز (P) إذا كانت انسحابية (Prismatic)، الشكل التالي يوضح المرحلة الأولى من مراحل تنفيذ البرنامج عند تحديد ذراع آلية رباعية درجة الحرية الموضحة في الشكل (5) والتي تملك أربع مفاصل، المفصلان الأول والرابع دورانية، أما المفصلان الثاني والثالث فهي انسحابية.

الشكل (9) المرحلة الأولى من مراحل تنفيذ البرنامج

المرحلة الثانية: يتم الانتقال إلى المرحلة الثانية بالنقر على الزر (التالي) الموجود على واجهة المرحلة الأولى، في هذه المرحلة يتم إدخال بارمترات دينيفيد – هارتينبيرغ للذراع الآلية المحددة، الشكل التالي يوضح المرحلة الثانية من مراحل تنفيذ البرنامج والذي يتضمن بارمترات دينيفيد – هارتينبيرغ لذراع آلية رباعية درجة الحرية الموضحة في الشكل (5).

الشكل (10) المرحلة الثانية من مراحل تنفيذ البرنامج

المرحلة الثالثة: يتم الانتقال إلى المرحلة الثالثة بالنقر على الزر (التالي) الموجود على واجهة المرحلة الثانية، في هذه المرحلة يتم حساب مصفوفات دوران وصلات الذراع الآلية المحددة بالاعتماد على بارمترات دينيفيد – هارتينبيرغ التي تم إدخالها في المرحلة السابقة، الشكل التالي يوضح المرحلة الثالثة من مراحل تنفيذ البرنامج والذي يتضمن نتيجة حساب البرنامج لمصفوفات دوران وصلات الذراع الآلية الموضحة في الشكل (5).

الشكل (11) المرحلة الثالثة من مراحل تنفيذ البرنامج

المرحلة الرابعة: في هذه المرحلة يتم حساب السرعات الخطية والزاوية لوصلات الذراع الآلية المحددة وذلك بالاعتماد على العلاقات التي تم الحصول عليها عند حساب سرعة وصلات الذراع الآلية، حيث يتم الحصول على

السرعات الخطية بالنقر على زر حساب السرعات الخطية، وكذلك الأمر بالنسبة لحساب السرعات الزاوية يتم بالنقر على زر حساب السرعات الزاوية، والشكل التالي يوضح طريقة حساب السرعات الخطية والزاوية لذراع آلية رباعية درجة الحرية الموضحة في الشكل (5).

الشكل (12) المرحلة الرابعة من مراحل تنفيذ البرنامج

المرحلة الخامسة: في هذه المرحلة يتم حساب القوى والعزوم الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية المحددة وذلك بالاعتماد على العلاقات التي تم الحصول عليها عند حساب القوى والعزوم الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية، حيث يتم الحصول على القوى الستاتيكة بالنقر على زر حساب القوى الستاتيكة، وكذلك الأمر بالنسبة لحساب العزوم يتم بالنقر على زر حساب العزوم الستاتيكية، والشكل التالي يوضح طريقة حساب القوى والعزوم الستاتيكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية الموضحة في الشكل (5).

الشكل (13) المرحلة الخامسة من مراحل تنفيذ البرنامج

المرحلة السادسة: في هذه المرحلة يتم حساب القوى والعزوم الديناميكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية المحددة وذلك بالاعتماد على طريقة لاغرانج، حيث في البداية يتم تحديد عزم العطالة لكل مفصل بالنسبة لأي محور من المحاور الاحداثية (X, Y, Z)، بعد ذلك يتم الحصول على العزوم الديناميكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية بالنقر على زر حساب العزوم الديناميكية، والشكل التالي يوضح هذه المرحلة من مراحل تنفيذ البرنامج من أجل حساب العزوم الديناميكية المؤثرة على وصلات الذراع الآلية الموضحة في الشكل (5).

الشكل (14) المرحلة السادسة من مراحل تنفيذ البرنامج

النتائج والمناقشة:

1- من خلال الدراسة الكينماتيكية للذراع الآلية تم الوصول إلى مصفوفة التحويل المتجانسة التي تعبر عن موضع ودوران المقبض بالنسبة إلى القاعدة، وهي بشكل عام تعتبر الخطوة الأولى عند تصميم الأذرع الآلية مهما كانت درجة الحرية التي تتميز بها.

2- في الدراسة الستاتيكية تم معرفة القوى والعزوم المؤثرة على وصلات الذراع الآلية حيث تبين أن المفصل الرابع يتعرض إلى عزوم مطبقة حول المحور (X) فقط، بينما يتعرض المفصل الثالث إلى عزوم مطبقة حول المحورين (X،y)، أما المفصلان الأول والثاني فيتعرضان إلى عزوم مطبقة حولَ كل من المحاور (X,Y,Z).

3- تم الوصول إلى قيم العزوم المطلوب تقديمها من محركات وصلات الذراع الآلية من خلال معرفة الطاقة الكامنة والطاقة الحركية لكل وصلة من وصلات الذراع عند استخدام طريقة لاغرانج في مرحلة الدراسة الديناميكية.

4- تم إعداد برنامج حاسوبي لمحاكاة عمل الذراع وتحديد العزوم والسرع للوصلات والمفاصل.

الاستنتاجات والتوصيات:

يُمكن اعتبار هذا العمل قاعدة أساسية يمكن الاعتماد عليها عند تصميم أذرع آلية رباعية درجات حرية تملك حركتين دورانيتين حول كل من المحاور (Y, Z) وحركتين انسحابيتين باتجاه كل من المحاور (Y, Z) حيث من خلالها يتم الحصول على مصفوفة التحويل المتجانسة التي تصف موقع ودوران المقبض بالنسبة إلى جملة إحداثيات مرجعية ثابتة، بالإضافة إلى معرفة العزوم المؤثرة على جميع المفاصل والمطلوب تقديمها من المحركات .

المراجع:

1- SANDLER, B. *Robotics, Designing the Mechanisms for Automated Machinery*, Academic Press, London 2002.

2- PAUL, E.; SANDIN. *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*, McGraw-Hill 2003.

3- J. NORBERTO, P. *Welding Robots Technology, System Issues and Applications*, *Springer-Verlag*, London Limited 2006.

4- ROTH, B. *Advances in Robot Kinematics Mechanisms and Motion*, Springer, USA, 2006.

5- Dr. JAYDEV, P.; DESAI **.** *Robotics and Automation Handbook [8]*, CRC Press LLC, 2005.

6- CRAIG, J.J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 4nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 2003.

7- Dr. M. ANTONIO - *Dynamics for Robotic Manipulators Notes for the Robotics Lecture*, UMIST, Manchester, UK v2.0 November 2005.

8- Dr. M. HANSELMAN - *Mastering Matlab, A comprehensive Tutorial and Reference*, Prentice Hall, USA. 2005.