



الجمهورية العربية السورية  
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا  
ماجستير روبوتيك  
العام الدراسي 2021/2020

## المساهمة في تطوير خوارزميات التحكم بموضع ذراع محمول بدرجتي حرية

---

دراسة أعدت لنيل شهادة الماجستير في نظم التحكم والروبوتيك  
اختصاص روبوتيك

إعداد

م. أمل الجمعة

إشراف

د. سالم فرح

د. سامر عون

شباط 2021

Syrian Arab Republic

Higher Institute for Applied Sciences and Technology

Electrical Systems and Mechanical department



# Contribution to the development of position control algorithms for portable arm with 2DOF

---

A thesis

In Partial Fulfilment

Of the Requirements for the Degree of

Master of Control and Robotic

In

Robotics

By:

**Eng. Amal Algoumaa**

Supervised by:

**Dr. Samer Aoun**

**Dr. Salem Farah**

**4/3/2021**

## المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

### Higher Institute for Applied Sciences and Technology

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا مؤسسة حكومية للتعليم العالي أحدثت بموجب المرسوم التشريعي رقم /24/ لعام 1983، وذلك بهدف إعداد كوادر علمية متميزة من مهندسين وباحثين للإسهام الفاعل في عملية التطوير العلمي والتنمية في الجمهورية العربية السورية.

يمنح المعهد العالي درجة الإجازة في الهندسة في الاتصالات والمعلوماتية والنظم الإلكترونية والميكاترونيكس وعلوم وهندسة المواد وهندسة الطيران. يقبل المعهد العالي لدراسة هذه الاختصاصات شريحة منتقاة من المتفوقين في الشهادة الثانوية من الفرع العلمي. يتيح المعهد العالي أيضاً برامج ماجستير أكاديمي في نظم الاتصالات وفي التحكم والروبوتيك وفي نظم المعطيات الكبيرة ونظم المعلومات ودعم القرار وفي علوم وهندسة المواد وعلوم وهندسة البصريات. وأخيراً، يمنح المعهد العالي درجة الدكتوراه في الاتصالات والمعلوماتية ونظم التحكم والفيزياء التطبيقية. تُحدث في المعهد العالي اختصاصات جديدة بحسب متطلبات سوق العمل وتوجهات البحث والتطوير المحلية والعالمية.

إلى جانب النشاط التعليمي، يمارس المعهد العالي عبر جهود أطره وفعالياته العلمية المختلفة نشاطاً حثيثاً في البحث والتطوير، إذ ينفذ مشاريع ودراسات واستشارات متنوعة لصالح الجهات العامة والخاصة في القطر، كما يتعاون مع جهات خارج القطر في بعض المشاريع البحثية والتطويرية. يسعى المعهد أيضاً، عبر دورات تدريبية نظرية وعملية متاحة للقطاعين العام والخاص وللأفراد، إلى إفادة أوسع فئة من المهتمين من إكسابهم آطره العلمية ومختبراته. واستكمالاً لدوره الرائد في مجال التعليم ونشر العلم، ينشر المعهد العالي كتباً علمية عالية المستوى من نتاج أطره، منها ما هو تدريسي يوافق المناهج في المعهد العالي ويفيد شريحة واسعة من الطلاب الجامعيين عموماً، ومنها ما هو علمي ثقافي. يتيح المعهد العالي بعضاً من منشوراته على موقعه على الشبكة، كما يتيح إمكانية الاطلاع على رسائل الماجستير والدكتوراه المنفذة في المعهد العالي وعلى بعض منشورات طلابه وأطره من المقالات العلمية.

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، الجمهورية العربية السورية، دمشق، ص.ب 31983

Higher Institute for Applied Sciences and Technology – HIAST

P. O. Box 31983, Damascus, Syrian Arab Republic

هاتف 00963115123819 - فاكس 00963115140761

بريد إلكتروني [contact@hiast.edu.sy](mailto:contact@hiast.edu.sy)

موقع إلكتروني [www.hiast.edu.sy](http://www.hiast.edu.sy)

## تصريح

أنا الموقع أدناه م. أمل الجمعة مُعدّة أطروحة الماجستير التي تحمل العنوان:

### المساهمة في تطوير خوارزميات التحكم بموضع ذراع محمول بدرجتي حرية

أصرح بأن:

- الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة هي نتيجة جهودي الشخصية ويتوجيه من المشرف، وأن ما عدا ذلك من معلومات ونتائج قد نُسبت إلى مصادرها ومؤلفيها، وأشير إلى ذلك في متن النص وفي قائمة المراجع.
- المعطيات والمعلومات المستخدمة في هذه الأطروحة جرى تحصيلها بطرائق سليمة ومشروعة ونُسبت إلى مصادرها في المواضع الملائمة.
- كلّ مكوّن من مكونات هذه الأطروحة (مقطع نصّي، صورة، مخطط، ...) مقتبس من عمل آخر جرى تمييزه بوضوح ونُسب إلى مصدره.
- الأعمال والنتائج المعروضة في هذه الأطروحة لم تُستخدم سابقًا وليست قيد الاستخدام للحصول على أي شهادة أكاديمية أخرى.

التوقيع



دمشق / 4 / 3 / 2021

## الإهداء

---

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى ذلك الشيب الذي أعتز به، وتلك الكف التي بذلت كل ما  
تملك في سبيلي، إلى تلك النظرات التي ملؤها الأمل، وتلك الإرادة  
في تحدي كل الصعاب.

والذي الحبيب

إلى الحضن الدافئ في برد الحياة، والعطاء الروحي الدافق، ومن  
بوجودها ألتمس الطمأنينة والسعادة.

أمي العزيزة

إلى هبة الله لي.. أنيس نفسي في كل لحظاتي.. سندي في هذا الزمان  
الصعب، ومن صار لي مصدر كل خير وكل جميل.

زوجي الغالي

إلى أرواح شهدائنا الأبرار الذين نتنعم بالحياة بفضل تضحيتهم،  
أخوتي أصدقائي ومن لهم محبة في قلبي.

أهدي هذا العمل المتواضع مع فائق الحب

والامتنان.....

## كلمة شكر

---

بعد معاناة وبحثٍ وسهرٍ وطول انتظار تكرم الله سبحانه وتعالى عليّ  
باكتمال هذا العمل وانتهائه، فله الحمد والشكر على ما منّه عليّ من التوفيق  
وتهيأة الأسباب.

ثم وأخص بالذكر من كانوا مصدر المعرفة والمعلومة، فوقفوا بجانبني  
وساندوني في إنجاز هذا العمل وأشرفوا عليه طوال فترة إعداده: الدكتور  
سامر عون والدكتور سالم فرح، وأتوجه اليهما بفائق الشكر والامتنان  
والاحترام، وأسأل الله العليّ القدير لهما أن يزيدهما من نعيمه.  
كما وأشكر زوجي الغالي على قلبي، الذي له بصمة بيضاء لن أنساها،  
فلم أجده إلا رجلاً يتحمل ظروفٍ ويستوعب انشغالي ويرفع معنوياتي، بل  
ويحثني على المتابعة والمثابرة حين أتعب.

## الملخص

الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو دراسة عدد من المتحكمات الشهيرة المناسبة للأنظمة اللاخطية للتحكم بذراع روبوت هجين مدولب ذي درجتي حرية ومقارنة أدائها في المجال الزمني اعتماداً على خصائص استجابة الذراع في الحلقة المغلقة.

نقطة التركيز الأكثر أهمية في هذه الأطروحة هي الاستفادة من الاتصال بين جمل التحكم المبنية في بيئة MATLAB-SIMULINK® والنموذج الميكانيكي في بيئة ADAMS® باستخدام النمذجة التشاركية، التي تسمح بنمذجة أكثر دقة لذراع الروبوت، واختبار استجابة المنظومة الميكانيكية بوجود جمل التحكم.

قمنا بتصميم متحكم PID متعدد النماذج Multiple Model PID ليكون قادراً على التعامل مع اللاخطية الموجودة في ذراع الروبوت، ثمّ تصميم المتحكم الترجيحي Fuzzy الذي تمّ دمج مع المتحكم PID فحصلنا على متحكم هجين Fuzzy-PID مما يسمح لنا بالاستفادة من خصائص كل منهما. وبعد ذلك تمّ تصميم المتحكم التنبئي متعدد النماذج Multiple MPC والمتحكم التنبئي التكيفي Adaptive MPC الذين يعتمدان على النموذج الرياضي للذراع من أجل التنبؤ بسلوكها في لحظات مستقبلية.

كما تمّ في هذه الأطروحة تصدير خوارزميات التحكم إلى الحواسيب المصغرة (Raspberry Pi) بهدف تنفيذها عليها بشكل مستقل باستخدام تقنية المحاكاة Processor In Loop (PIL)، وذلك من أجل تقييم قدرتها على تنفيذ هذه الخوارزميات بشكل صحيح أولاً، وفي الزمن الحقيقي ثانياً، وتحديد تردد العمل الأعظمي لها.

تمت دراسة صلاحية المتحكمات السابقة بإضافة حمل متغير على نموذج الذراع في بيئة ADAMS® وملاحظة أثره على استجابة الذراع.

استناداً إلى نتائج المحاكاة التشاركية، فإنّ هذه الدراسة تُبيّن لنا أنّ المتحكم Adaptive-MPC هو أفضل المتحكمات المدروسة من حيث الاستجابة والتجاوز وزمن الاستقرار والصلاحية عند تغيير معاملات النظام، وتُبيّن إمكانية تنفيذه في الزمن الحقيقي على بطاقة Raspberry Pi.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة التشاركية، المتحكم الترجيحي التناسبي التفاضلي التكاملية، المتحكم التناسبي التفاضلي التكاملية متعدد النماذج، بطاقة الراسبري، بطاقة أردوينو، الترجمة الآلية.

# Abstract

The main aim of this thesis is to study several known controllers that are suitable to deal with nonlinear systems to control a robotic arm with two degrees of freedom mounted on a hybrid wheeled robot, and to compare its performance in time domain, based on the response characteristics in the position closed-loop control system.

The most important focus of this thesis is to benefit from the connection between the control blocks built in MATLAB-SIMULINK® environment and the mechanical model built in ADAMS® environment using Co-simulation, which allows precise modeling of the robot arm, and testing the mechanical model's response to commands from the control blocks.

The study covered the Multiple Model PID controller, designed to deal with the nonlinearity of the robot arm; the Fuzzy-PID hybrid controller, designed to benefit from the characteristics of both fuzzy and PID controllers; the Multiple mathematical models of the arm to predict its behavior in the future moments; and the Adaptive MPC, using the nonlinear mathematical model of the arm.

The ability of the target hardware (Raspberry Pi) to execute these controllers in real-time and the maximum sampling rate was studied using Processor in The Loop (PIL) simulation, where Simulink models were cross-compiled for the target hardware (Raspberry Pi and Arduino due) and executed on it.

The robustness of these controllers to load variation was investigated by changing the load held by the arm's grip in the mechanical model in ADAMS®.

Based on the Co-simulation results, this study proved that the adaptive MPC outperforms the rest regarding response time, overshoot, settling time and robustness to changes in system's

parameters, and proved the possibility of its execution in real time on the Raspberry Pi board.

KeyWords: Co-Simulation, PID controller, Multiple-PID, Raspberry-Pi, Arduino Due, Processor In the Loop.

## الفهرس

I.....	الإهداء
II.....	كلمة شكر
III.....	الملخص
IV.....	Abstract
1.....	1. التعريف بالبحث
2.....	1.1. مقدمة
4.....	2.1. مشكلة البحث
4.....	3.1. هدف البحث
5.....	4.1. منهجية البحث
5.....	5.1. أدوات البحث الرئيسية
6.....	6.1. بنية الأطروحة
7.....	7.1. الخلاصة
8.....	2. خوارزميات التحكم الآلي المطبقة
9.....	1.2. مقدمة
9.....	2.2. دراسة مرجعية
13.....	3.2. لمحة تاريخية عن المتحكم PID
14.....	4.2. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID
15.....	5.2. طرق ضبط معاملات المتحكم PID
17.....	6.2. لمحة تاريخية عن المنطق الترجيحي (Fuzzy logic)
17.....	7.2. بنية المتحكم الترجيحي Fuzzy Controller
18.....	1.7.2. التعويم Fuzzification
18.....	2.7.2. المؤثرات الترجيحية
19.....	3.7.2. قواعد التحكم الترجيحية Fuzzy control rules
20.....	4.7.2. الاستدلال الترجيحي Fuzzy inference
21.....	5.7.2. فك التعويم Defuzzification

22	8.2	جدولة الربح التكيفي Fuzzy-PID controller
23	9.2	خوارزمية التحكم التنبئي Model Predictive Control
25	1.9.2	مفاهيم أساسية
25	1.1.9.2	الاعتماد على عملية التنبؤ
25	2.1.9.2	عملية التنبؤ مبنية على نموذج الجملة
26	3.1.9.2	اختيار أمر التحكم الأمثل
26	4.1.9.2	أفق التنبؤ
27	5.1.9.2	المعايرة
27	6.1.9.2	قيود النظام
28	7.1.9.2	النموذج المستخدم في المتحكم التنبئي
29	8.1.9.2	تابع الكلفة Cost Function
31	2.9.2	التحكم التنبئي متعدد النماذج Multiple Model MPC
32	3.9.2	التحكم التنبئي التكيفي Adaptive-MPC
32	10.2	النمذجة التشاركية بين برنامجي MATLAB و ADAMS
34	1.10.2	تعريف برنامج MATLAB
34	2.10.2	تقنية المحاكاة PIL
35	3.10.2	تعريف برنامج ADAMS
35	11.2	الحواسيب المصغرة (mini-computer)
35	1.11.2	بطاقة آردوينو Arduino
36	2.11.2	بطاقة راسبري باي "Raspberry-Pi"
37	12.2	الخلاصة
38	3	الدراسة النظرية
39	1.3	الدراسة الحركية والتحريرية للذراع
39	1.1.3	النموذج الهندسي المباشر
39	2.1.3	النموذج الهندسي العكسي
40	2.3	النموذج الديناميكي لذراع الروبوت
44	3.3	نمذجة محرك تيار مستمر ذو مغناطيس ثابت DC

46	4.3. تمثيل نموذج الذراع والمحرك في فضاء الحالة.....
50	1.4.3. إيجاد النموذج الديناميكي عند نقطة عمل محددة.....
51	5.3. الخلاصة.....
52	4. النمذجة التشاركية والمحاكاة.....
53	1.4. مقدمة.....
53	2.4. تنفيذ النمذجة التشاركية Co-simulation.....
54	3.4. النموذج الافتراضي لذراع الروبوت الهجين.....
56	4.4. تصميم المتحكم Multiple Model-PID.....
60	5.4. تصميم المتحكم Fuzzy-PID.....
67	6.4. تصميم المتحكم MPC.....
67	1.6.4. تصميم المتحكم Multiple Model MPC.....
71	2.6.4. تصميم المتحكم Adaptive MPC.....
72	7.4. الخلاصة.....
74	5. نتائج المحاكاة.....
75	1.5. معايير تقييم أداء خوارزميات التحكم الآلي في المجال الزمني.....
76	2.5. العمل التجريبي (سيناريو التجارب المطبقة).....
77	1.2.5. دراسة الاستجابة بدون وجود حمل.....
77	1.1.2.5. إشارة دخل خطوية بدون حمل.....
81	2.1.2.5. إشارة دخل متغيرة خطياً بدون حمل.....
86	2.2.5. دراسة الاستجابة مع وجود حمل.....
	1.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Multi- PID.....
86	2.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Fuzzy- PID.....
89	3.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Multi- MPC.....
92	4.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Adaptive- MPC.....
95	MPC.....

98	3.5. أثر أفق التنبؤ على الاستجابة.....
101	4.5. أزمنة تنفيذ الخوارزميات باستخدام المحاكاة PII.....
103	5.5. الخلاصة.....
104	6. الخاتمة والآفاق المستقبلية.....
105	1.6. الخاتمة.....
106	2.6. الآفاق المستقبلية.....

## فهرس الأشكال

- الشكل 2-1: مخطط عام لنظام تحكم بحلقة مغلقة..... 10
- الشكل 2-2: المخطط الصندوقي للمتحكم PID..... 15
- الشكل 2-3: تغيير قيم المعامل التناسبي وفقاً لمجال تغيير العمل..... 16
- الشكل 2-4: مكونات نظام المنطق الترجيحي..... 18
- الشكل 2-5: طريقة Max-Min ممداني..... 21
- الشكل 2-6: بنية المتحكم Fuzzy-PID..... 23
- الشكل 2-7: المكونات الأساسية لخطة تنفيذ خوارزمية MPC..... 24
- الشكل 2-8: خطوات تنفيذ الخوارزمية التنبئية..... 25
- الشكل 2-9: انسحاب أفق التنبؤ مع الزمن..... 27
- الشكل 2-10: الأخطاء المتوقعة للخروج المستقبلي..... 30
- الشكل 2-11: قيم أمر التحكم ضمن فضاء تحكم طوله 3 عينات..... 31
- الشكل 2-12: المخطط الصندوقي لنظام التحكم التنبئي النموذج متعدد النماذج..... 32
- الشكل 2-13: بنية المتحكم التنبئي التكيفي..... 32
- الشكل 2-14: الطريقة التقليدية لتصميم الأنظمة الميكاترونية..... 33
- الشكل 2-15: تصميم الأنظمة الميكاترونية باستخدام النمذجة التشاركية..... 33
- الشكل 2-16: عملية المعالجة باستخدام تقنية PII ضمن حلقة التحكم..... 34
- الشكل 2-17: بطاقة Arduino-Due..... 36
- الشكل 2-18: بطاقة Raspberry-PI3 B+..... 36
- الشكل 3-1: المخطط الحركي للذراع..... 39
- الشكل 3-2: نمذجة المحرك كهربائياً..... 45
- الشكل 3-3: نمذجة محرك DC..... 46
- الشكل 3-4: ربط نظامين على التسلسل..... 47
- الشكل 4-1: الحلقة المغلقة بين ADAMS و MATLAB/Simulink..... 53
- الشكل 4-2: المنظومة المصدرة إلى MATLAB/Simulink..... 54
- الشكل 4-3: مكونات الروبوت الهجين..... 55
- الشكل 4-4: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Multi-PID..... 57
- الشكل 4-5: مكونات وحدة التحكم Multipl\_PID\_Controller..... 58
- الشكل 4-6: حلقة التحكم المغلقة لكلا المفصلين باستخدام Multi-PID وإضافة المحاكاة PII..... 59
- الشكل 4-7: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Multi-PID..... 60
- الشكل 4-8: بنية نظام المنطق الترجيحي..... 61
- الشكل 4-9: متغيرات الدخل. (a) الخطأ، (b) التغيير في الخطأ..... 62

الشكل 4-10: متغيرات الخرج. (c) الربح التناسبي، (d) الربح التكاملي، (f) الربح التفاضلي	63
الشكل 4-11: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Fuzzy-PID	64
الشكل 4-12: حلقة التحكم باستخدام وحدة التحكم Fuzzy-PID مع المحاكاة PIL	65
الشكل 4-13: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Fuzzy-PID	66
الشكل 4-14: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Multiple Model MPC	68
الشكل 4-15: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Muliple-MPC-Controller مع المحاكاة PIL	69
الشكل 4-16: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Multi-MPC	70
الشكل 4-17: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Adaptive-MPC	71
الشكل 4-18: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Adaptive-MPC مع المحاكاة PIL	71
الشكل 4-19: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Adaptive-MPC	72
الشكل 5-1: خصائص الاستجابة الخطوية في المجال الزمني	75
الشكل 5-2: استجابة كلا المفصلين لأوامر التحكم الصادرة عن المتحكمات	77
الشكل 5-3: إشارة الخطأ لكلا المفصلين عند تطبيق دخل خطوي	78
الشكل 5-4: أوضاع المفاصل بحسب الدخل الخطوي المطبق	79
الشكل 5-5: استجابة الذراع لأوامر تحكم الخوارزميات السابقة لدخل Ramp	81
الشكل 5-6: إشارة خطأ الاستجابة لدخل Ramp	82
الشكل 5-7: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام المتحكم Multi-PID	87
الشكل 5-8: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام متحكم Multi-PID	88
الشكل 5-9: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام المتحكم Fuzzy-PID	90
الشكل 5-10: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام متحكم Fuzzy-PID	91
الشكل 5-11: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام المتحكم Multi-MPC	93
الشكل 5-12: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام متحكم Multi-MPC	94
الشكل 5-13: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام المتحكم Adaptive-MPC	96

الشكل 5-14: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال على الذراع باستخدام متحكم	
Adaptive-MPC	97
الشكل 5-15: أثر أفق التنبؤ على استجابة كلا المفصلين للمتحكم Multi-MPC	99
الشكل 5-16: تأثير أفق التنبؤ على استجابة كلا المفصلين للمتحكم Adaptive-MPC	
	100

## فهرس الجداول

جدول 1-2: أثر معاملات المتحكم PID على استجابة الحلقة المغلقة في المجال الزمني.....	15
جدول 2-2: أرباح معاملات المتحكم PID بحسب مجالات العمل.....	16
جدول 1-4: الخصائص الميكانيكية للذراع.....	56
جدول 2-4: طريقة زيغلر-نيكولس.....	56
جدول 3-4: اعدة الأوامر للربح التناسبي $K_p$ .....	63
جدول 4-4: قاعدة الأوامر للربح التكاملي $K_i$ .....	64
جدول 5-4: قاعدة الأوامر للربح التفاضلي $K_d$ .....	64
جدول 1-5: خصائص الاستجابة الزمنية للمفصل الأول عند تطبيق مجموعة مواضع مرجعية.....	84
جدول 2-5: خصائص الاستجابة الزمنية للمفصل الثاني عند مجموعة مواضع مرجعية.....	85
جدول 3-5: زمن تشغيل خوارزمية Multi-PID على بطاقة A-Due.....	101
جدول 5-4: زمن تشغيل خوارزمية Fuzzy-PID على بطاقة A-Due.....	101
جدول 5-5: زمن تشغيل خوارزمية Multi-PID على بطاقة Raspberry-PI.....	101
جدول 6-5: زمن تشغيل خوارزمية Fuzzy-PID على بطاقة Raspberry-PI.....	102
جدول 7-5: زمن تشغيل خوارزمية Multi-MPC على بطاقة Raspberry-PI.....	102
جدول 8-5: زمن تشغيل خوارزمية Adaptive-MPC على بطاقة Raspberry-PI.....	102

	الرموز	
symbol	Name	unit
$r, r(t)$	Reference input	
$e, e(t)$	Error between the input signal and the output	
$u, u(t)$	Input applied by the controller to plant	
$y, y(t)$	Output of the closed loop control system	
$G_p(s)$	Plant transfer function	
$H(s)$	Feedback measurement	
$D(s)$	Disturbance input	
$K_p$	Proportional gain	
$K_i$	Integral gain	
$K_d$	Derivative gain	
$N_c$	Control Horizon	
$N_p$	Prediction Horizon	
$x_k$	System state	
$L$	Lagrangian	
$\theta_i$	Joint Variable	
$\dot{\theta}_i$	Vector of angular velocity	
$\ddot{\theta}_i$	Vector of angular acceleration	
$g$	Vector of Gravity	$m/s^2$
$V$	Rated voltage	v
$R_a$	Armature Resistance	$\Omega$
$L_a$	Armature Inductance	H
$I$	Rated Current	A
$\tau$	External Torques	N.m
$B^k, A^k$	Fuzzy sets	
$\mu_{B^k}, \mu_{A^k}$	Membership function for a fuzzy sets	A, B
$L_1$	Length Arm1	m
$L_2$	Length Arm2	m
$v$	Linear velocity vectors	m/s
$E$	Kinematic Energy	J
$U$	Potential Energy	J
$m_1, m_2$	Mass arm1, arm2	kg

الاختصارات		
PID	Proportional Integral Differential	متحكم تناسبي تفاضلي تكاملي
Z-N	Ziegler-Nicols	زيغلر - نيكولز
MPC	Model Predictive Control	المتحكم التنبئي
FLC	Fuzzy Logical Control	متحكم المنطق الترجيحي
Multi-PID	Multiple Model Proportional Integral Differential	متحكم تناسبي تفاضلي تكاملي متعدد النماذج
FPID	Fuzzy Proportional Integral Differential	متحكم تناسبي تفاضلي تكاملي ترجيحي
DC	Direct Current	تيار مستمر
ESS	Steady State Error	خطأ الحالة الثابتة
PIL	Processing In Loop	
TS	Takagi-Sugeno	
Multi-MPC	Multiple Model Predictive Control	متحكم تنبئي متعدد النماذج
FSC	Fuzzy Supervisory Controller	
SISO	Single Input Single Output	دخل وحيد- خرج وحيد
MIMO	Multiple Input Multiple Output	متعدد المدخل- متعدد المخرج
SOC	System On Chip	نظام في الشريحة
CAD	Computer-Aided Design	تصميم بمساعدة الحاسب
MATLAB	Matrix Laboratory	
SI	International System of Units	وحدات النظام الدولي
A-Due	Arduino Due board	بطاقة آردوينو
R-Pi	Raspberry-Pi3 B+ board	بطاقة راسبري باي

# الفصل الأول

## 1. التعريف بالبحث

نعرض في هذا الفصل مقدمة عن أهمية الأذرع الروبوتية والاستخدام المتزايد لها وتطور خوارزميات التحكم بما يتناسب مع المتطلبات الصناعية وأهمية النمذجة التشاركية في بناء نموذج أولي متكامل يضم الميكانيك والتحكم وكما تمّ تحديد مشكلة البحث والهدف منه والمنهجية المعتمدة في هذا العمل، وصولاً إلى البرمجيات المستخدمة في بناء نظام التحكم.

## 1.1. مقدمة

تعتمد الصناعات الحديثة في هذه الأيام على الأذرع الروبوتية الثابتة والروبوتات المتحركة المزودة بذراع بشكل كبير خاصةً فيما يتعلق بتنفيذ المهمات التكرارية كعمليات اللحام والتجميع في مصانع السيارات والعمل في الأماكن التي يصعب التواجد فيها كالفضاء وأعماق البحار وجوف الأرض، والأماكن الحاوية على مواد خطيرة كالمفاعلات النووية والمواد الكيميائية، لذا يُعتبر استخدام الروبوت فيها كبديل عن الإنسان أمراً مثالياً.

الروبوتات هي منظومات الكتروميكانيكية معقدة يتطلب تصميمها الربط بين مزيج من التخصصات الهندسية (الميكانيكية، الكهربائية والالكترونية) بالإضافة لعلوم الكمبيوتر كالبرمجة، وهذا ما يتطلب وجود بيئة نمذجة متعددة المجالات تُتيح للمصممين تجسيد فكرتهم في نموذج أولي متكامل، والتي يمكن تحقيقها باستخدام ما يُعرف بالنمذجة التشاركية التي تعتمد على ربط برنامجين منفصلين أو أكثر من برامج المحاكاة في وقت واحد من أجل وضع نماذج لمختلف مكونات النظام. تتواصل هذه البرامج أثناء عملية التنفيذ، لتعمل بالتوازي فتتبادل البيانات فيما بينها باستمرار للتحقق من سلوك كل مُكوّن من النظام تحت ظروف عمل محددة. تُساعد النمذجة التشاركية المصمم على خفض التكاليف وتؤمن له الإدارة الفعالة لوقت التصنيع مع رفع مستوى الإنتاجية كما تُزوّده برؤية واسعة لسلوك النظام وهذا يعتبر مهماً جداً فهو يُتيح له اكتشاف الأخطاء الديناميكية وتحسين المعاملات وتحليل نتائج الاختبار بالإضافة إلى معرفة مدى موثوقية الأنظمة من خلال التجارب التكرارية.

تستند إحدى طرق النمذجة التشاركية في مجال محاكاة النظم الكتروميكانيكية على برنامجي  $ADAMS^{\circledR}$  و  $MATLAB-SIMULINK^{\circledR}$ ، حيث يتم بناء النموذج الافتراضي للنظام الميكانيكي في بيئة  $Computer Aided Design (CAD)$  ومن ثم نقله إلى برنامج  $ADAMS^{\circledR}$  بدلاً من استخدام نموذج رياضي مُبسط للنموذج الميكانيكي، وبعد ذلك يتم تعريف مُدخلات ومُخرجات التحكم بالنظام وإرسالها إلى  $MATLAB\_SIMULINK^{\circledR}$  ليتمّ هناك بناء خوارزميات التحكم وأخيراً دراسة أداء النموذج الميكانيكي مع مُختلف هذه الخوارزميات. تتطلب قيادة الأذرع الروبوتية وجود مفعّلات تحول الطاقة المقدمه إليها إلى طاقة حركية (الطاقة المسؤولة عن تنفيذ الحركات) ومن هذه المفعّلات نجد المحركات الكهربائية، المفعّلات الهيدروليكية (باستخدام السوائل المضغوطة) والمفعّلات البنيوماتيكية (باستخدام الهواء المضغوط). تُعتبر المحركات الكهربائية هي الأكثر استعمالاً حتى الآن من بين المفعّلات السابقة، نظراً لامتلاكها العديد من الخصائص المفيدة، كالخطية وسهولة التحكم في حركتها سرعةً واتجاهاً.

تمّ تصميم العديد من خوارزميات التحكم الآلي بهدف السيطرة على أداء المفعّلات المرتبطة بالأذرع الروبوتية، وذلك عن طريق ارسال الأوامر إليها. حيث تُعد خوارزمية التحكم التقليدية PID الأكثر شيوعاً في مجال الروبوت نظراً لبساطتها وسهولة تنفيذها واستخدامها على نطاق واسع، ولكن على الرغم من أنّها طريقة فعّالة جداً وسهلة التنفيذ مع الأنظمة الخطية إلا أنّها ليست مناسبة تماماً للأنظمة اللاخطية المعقدة والمتغيرة مع الزمن لأنها قد تؤدي للوصول إلى حالة عدم استقرار. لذلك تمّ تطوير العديد من الحلول الأخرى مثل PID التكيفي للتعامل مع الأنظمة اللاخطية، ومنها تقنية التحكم باستخدام جدولة الربح بحيث يتم احتساب معاملات خوارزمية التحكم PID لكل مجال من مجالات التشغيل المختلفة، وتسمى هذه الخوارزمية PID متعدد الأنماط (Multi-PID) Multiple Model PID. من الطرق الأخرى لحل مشكلة اللاخطية، هي استخدام تحكم المنطق الترجيحي Fuzzy logic control (FLC) وهو أسلوب تحكم منطقي جديد نسبياً يحاكي طريقة التفكير البشري ويضيفها إلى برمجيات الحاسب، ويُعتبر هذا تحولاً من المنطق التقليدي الذي يُعبّر عنه بالخطأ والصواب أو بالأرقام واحد وصفر إلى المنطق الترجيحي متعدد القيم بين الصفر والواحد، ويعرّف البروفيسور لطفي زاده المنطق الترجيحي بأنّه "علم يهدف إلى استنتاج أنماط من القيم التقريبية بدلاً من القيم المؤكدة"، تمّ استخدام المنطق الترجيحي في جميع المجالات تقريباً وفي العديد من التطبيقات الصناعية، فمثلاً أول هذه التطبيقات الصناعية ما قامت بتطويره شركتنا اسمنت دانيماركيتان بهدف التحكم بالأفران والذي نفذ بشكل عملي في عام 1982 [1]. وقد استُخدمت نظرية المنطق الترجيحي على نطاق واسع منذ الثمانينات وحتى يومنا هذا وفي شتى المجالات كالمجال الصناعي والطبي والتعليمي وحتى في شركات الطيران ووكالات الفضاء وغيرها. وقد دُمجت هذه الطريقة مع تقنيات التحكم التقليدية مثل PID للاستفادة من خصائصهما معاً والحصول على طريقة فعّالة تُسمى Fuzzy-PID controller (FPID) والتي تتضمن ضبط معاملات PID بشكل تلقائي بدلاً من نهج Ziegler-Nichols التقليدي (Z-N)، حيث يقوم المتحكم الترجيحي بضبط المعاملات اعتماداً على خطأ الموضع ومعدل تغيره، وبالتالي الحصول على أداء أفضل من وحدات التحكم PID الثابتة.

على اعتبار أن جميع المتحكمات السابقة لم تتمكن من أخذ قيود النظام بعين الاعتبار سواء في الدخل أو الخرج أو متحولات الحالة، فإن ذلك دعا إلى تطوير متحكمات أقدر على التعامل مع قيود العمليات الإنتاجية، كالمتحكم التنبؤي Model Predictive Controller (MPC) وهو من أنماط التحكم الأمثلي ويتصف بفعالية التحكم بالأنظمة الخطية واللاخطية، كما يتيح التنبؤ بكيفية تصرف النظام في المستقبل خلال فترة زمنية محددة، ويقوم هذا المتحكم على فكرة حساب أمر التحكم الأمثلي في كل لحظة زمنية لتقليل الخطأ بين القيم المتوقعة والقيم الفعلية. وظهرت له

أنواع كثيرة منها التحكم التنبئي متعدد النماذج والتحكم التنبئي التكيفي. تعتمد إحدى الطرق المستخدمة من أجل تقييم ومقارنة أداء المتحكمات على عدة معايير توصف الخصائص المميزة في المجال الزمني لاستجابة الحلقة المغلقة عند تطبيق دخل محدد (خطوي، متزايد بشكل خطي، جيبي)، وهذه المعايير تتمثل بزمن الاستجابة، التجاوز، زمن الاستقرار والخطأ السكوني [2]. من جهة أخرى، حققت البطاقات الحاسوبية المتكاملة صغيرة الحجم نجاحاً مذهلاً في كلاً المجالين التعليمي والتطبيقي، وخاصة في تطبيقات التحكم، وذلك بسبب صغر حجمها وانخفاض ثمنها وأدائها العالي، إضافة إلى أنها مفتوحة المصدر وسهلة البرمجة. إن استثمار هذه البطاقات الحاسوبية في البحث العلمي يقدم ميزة كبيرة من خلال تسريع الوصول إلى بناء كيان صلب قادر على تنفيذ الخوارزميات المطورة.

## 2.1. مشكلة البحث

- الحاجة للتحكم بذراع روبوتية بدرجتي حرية محمولة على قاعدة متحركة، مزودة بقاطع أسلاك لكي نستخدمها في استكشاف وتأمين الأماكن الملغمة.
- اللاخطية العالية في النظام (ذراع روبوتية) والاضطرابات الخارجية التي يتعرض لها، حيث يُظهر التحليل الديناميكي للأذرع الروبوتية وجود علاقة بين عزوم الدوران التي يتم تطبيقها بواسطة المفعلات، وموضع وسرعة وتسارع ذراع الروبوت بالنسبة للزمن وتتمثل هذه العلاقة بمعادلات تفاضلية لاخطية تصف السلوك الديناميكي لها، والتي تُعتبر من المسائل التي تُشكل تحدياً لتصميم متحكم يضمن لها تحقيق استقرار جيد وأداء تحكيمي دقيق.

## 3.1. هدف البحث

- 1- شرح آلية النمذجة التشاركية ودورها في تسهيل دراسة النظم الميكاترونية ميكانيكياً وتحكيمياً.
- 2- التغلب على اللاخطية الموجودة في المعادلات التفاضلية التي تصف النموذج الديناميكي لذراع روبوت هجين مدولب ذات درجتي حرية عن طريق تطبيق بعض خوارزميات التحكم الآلي من أجل التحكم بموضعها وذلك باستخدام بيئة محاكاة تشاركية بين MATLAB-SIMULINK® و ADAMS® وضبط معاملات الخوارزميات ودراسة استجابة النظام لأوامر التحكم والمقارنة بين أدائها.
- 3- تقييم قدرة الحواسيب المصغرة على دراسة أداء الخوارزميات باستخدام تقنية الترجمة الآلية (PIL) Processor In the Loop التي تقدمها بيئة ماتلاب وتقييم

قدرة هذه الحواسيب على تنفيذ هذه الخوارزميات وتحديد تردد العمل الأعظمي لكل منها.

4- إغلاق حلقة التحكم في بيئة المحاكاة التشاركية بين Adams® و MATLAB-SIMULINK® وبطاقة Raspberry-PI باستخدام ذراع تحكم ذات درجتي حرية يتم تحريكها يدوياً كدخل مرجعي.

#### 4.1. منهجية البحث

تمّ القيام بالعمل البحثي وفق المراحل التالية:

1. دراسة مرجعية لبعض خوارزميات التحكم الآلي المستخدمة في مجال التحكم بالأذرع الروبوتية.
2. تنفيذ خوارزميات التحكم الآلي المعتمدة في هذا البحث ضمن بيئة MATLAB-SIMULINK® وتطبيقها على النموذج الافتراضي للروبوت وذلك بالاستفادة من النمذجة التشاركية مع برنامج ADAMS® لضبط معاملات الخوارزميات واختبار أدائها.
3. الاستفادة من تقنية المحاكاة Processor-In-Loop التي يُقدّمها برنامج MATLAB®، والتي تُعد جزءاً حاسماً من دورة التصميم لأنها تُمكننا من اختبار خوارزميات التحكم المصممة للكشف عن مشاكل التنفيذ في البيئة المدمجة "الحواسيب المصغرة"، منها بطاقة "Raspberry-Pi" (R-Pi) وبطاقة Arduino-Due (A-Due) من أجل دراسة أزمات التنفيذ وصحة الحسابات المنفذة على هذه البطاقات.
4. مقارنة أداء الخوارزميات السابقة اعتماداً على خصائص الاستجابة الزمنية في الحلقة المغلقة ومناقشة النتائج التي حصلنا عليها لاختيار الخوارزمية ذات الأداء الأفضل من حيث التجاوز، زمن الاستقرار زمن الصعود والخطأ السكوني.

#### 5.1. أدوات البحث الرئيسية

في هذا البحث تم استخدام البرمجيات التالية:

- برنامج ADAMS® للتصميم والمحاكاة الميكانيكية، المبني فيه النموذج الافتراضي لذراع الروبوت الهجين.
- برنامج MATLAB-SIMULINK® لبناء ومحاكاة خوارزميات التحكم الآلي.
- حزمة دعم المحاكاة Simulink Support Packages لبطقتي راسبري باي وأردوينو.

كما تمّ استخدام العتاد الصلب التالي:

- حاسب شخصي بمواصفات عالية، تسمح بإجراء المحاكاة على برنامجي ADAMS® و MATLAB-SIMULINK® بأن واحد.
- بطاقة راسبري باي (R-Pi B3)، وبطاقة A-Due.

## 6.1. بنية الأطروحة

تتألف هذا الأطروحة من ستة فصول رئيسية. فيما يلي وصف موجز لكل فصل:

- ❖ يُعنى الفصل الأول بتقديم مقدمة الأطروحة وأهميتها وأهدافها وتحديد مشكلة البحث والمكونات الأساسية لنظام التحكم الذي سيتم تصميمه.
- ❖ يقدم الفصل الثاني شرحاً للمتحكمات المستخدمة كمتحكم PID وتأثير معاملاته على استجابة النظام، وتقنية ضبط معاملاته والحصول على متحكم متعدد النماذج Multi-PID من أجل نقاط تشغيل مختلفة، والتحكم الترجيحي حيث يتم مناقشة بعض المفاهيم الأساسية لهذه النظرية، والتحكم التنبئي المعتمد على النماذج الرياضية Model Predictive Control ويُعتبر من المتحكمات متعددة المداخل ومتعددة المخارج Multi-input Multi-output. كما يشرح أهمية تصميم خوارزميات التحكم وتقنية PII والتي تسمح بعملية الترجمة الآلية للخوارزميات المصممة وتصديرها إلى عدد كبير من الحواسيب المصغرة.
- ❖ يقدم الفصل الثالث الدراسة النظرية المتضمنة إيجاد النموذج الهندسي المباشر والعكسي واستخدام أولر-لاغرانج للحصول على النموذج الديناميكي للذراع الروبوتية. وتمّ نمذجة محرك التيار المستمر المستخدم مع كل رابطة وإيجاد فضاء الحالة للجملة كاملة (المعادلات الديناميكية للذراع + نموذج محرك التيار المستمر).
- ❖ يتضمن الفصل الرابع الخطوات العملية لتصميم خوارزميات التحكم (Multi-PID, Fuzzy-PID, MPC) ضمن نظام تحكم متكامل. تطبيق هذه الخوارزميات ضمن بيئة MATLAB/SIMULINK® لإرسال أوامر التحكم بنموذج الذراع الروبوتية الموجودة ضمن بيئة ADAMS® وذلك بالاستفادة من تقنية النمذجة التشاركية، بهدف مقارنة أداء هذه المتحكمات واختيار المتحكم ذو الأداء الأفضل.
- ❖ وأما الفصل الخامس مخصص لنتائج البحث النهائية، حيث نجد فيه أشكال استجابة النظام لمجموعة من المواضيع المرجعية لتنفيذ الحركة المرغوبة من أجل كل

مفصل وإيجاد أزمنة تشغيل هذه الخوارزميات على الحواسيب المصغرة وإيجاد تردد العمل الأعظمي لها.

❖ الفصل السادس يتضمن الخاتمة والآفاق المستقبلية.

## 7.1. الخلاصة

تمّ في هذا الفصل عرض مقدمة عن أهمية الأذرع الروبوتية وضرورة وجود بيئة نمذجة متعددة المجالات عند تصميم النظم الإلكترونية ميكانيكية، والتي بدورها تسمح للمصممين بتجسيد فكرتهم في نموذج أول متكامل (النمذجة التشاركية)، وتحدثنا عن أهمية خوارزميات التحكم في السيطرة على أداء الأذرع الروبوتية، والنجاح الذي حققته البطاقات الحاسوبية المتكاملة في تطبيقات التحكم، وكما حددنا مشكلة البحث والأهداف المرجوة منه. وبعد ذلك ذكرنا مراحل إنجاز هذا البحث والأدوات البرمجية التي تمّ استخدامها.

## الفصل الثاني

### 2. خوارزميات التحكم الآلي المطبقة

نقوم في هذا الفصل بتقديم دراسة مرجعية عن أساليب التحكم المستخدمة في الأبحاث السابقة وتقديم لمحة تاريخية عن خوارزميات التحكم PID، Fuzzy و MPC التي تم استخدامها في هذا العمل من أجل التحكم بموضع ذراع روبوت هجين ذات درجتي حرية ووصف المكونات الأساسية لكل منها. وكما تم تعريف تقنية PIL التي تدعمها بيئة MATLAB-SIMULINK وتعريف الأدوات البرمجية التي استخدمت في هذا البحث.

## 1.2. مقدمة

نظرية التحكم هي فرع متعدد التخصصات من الهندسة والرياضيات تتعامل مع سلوك الأنظمة الديناميكية (Dynamical Systems)، وهي تهدف إلى بناء متحكمات قادرة على إصدار الأوامر على دخل الأنظمة لتحقيق خصائص الاستجابة المرغوبة. وباختلاف الموارد وتنوع الصناعات كان لابداً من التنوع في خوارزميات التحكم وطرق عمل المتحكمات لتغطية الشرائح المختلفة من العمليات الإنتاجية والظروف الصناعية وخاصةً في مجال التحكم بالأذرع الروبوتية. تُصنّف هذه الطرق بشكل عام إلى مجموعتين رئيسيتين هما: الطرق الخطية (التقليدية) الطرق اللاخطية (اللاتقليدية)، وكما يتم الدمج بين هذين النوعين للاستفادة من خصائص كل منهما. إنّ غالبية الأنظمة تتمتع بخصائص لخطية، لذلك طرق التحكم الخطية ليست قادرة لوحدها على التغلب على الاهتزازات والمعاملات اللاخطية مثل رد الفعل العكسي وتغيرات الحمل والمعاملات الأخرى التي لها تأثيرات غير متوقعة على استجابة الأنظمة حيث تقلل من أدائها، وبالتالي لن تتمكن من تحقيق المتطلبات المرغوبة. مما أدى إلى تطوير العديد من طرق التحكم اللاخطية مثل التحكم الترجيحي أو التحكم بالأنماط المنزلقة وغيرها من الطرق التكميلية اللاخطية.

## 2.2. دراسة مرجعية

يعود الترابط بين نظرية التحكم والروبوت لأكثر من نصف قرن تطوّرت خلاله نظرية التحكم حيث أخذ علماء الرياضيات دورهم إلى جانب المهندسين في إيجاد النظريات والنماذج الرياضية التي تصف عمل الأنظمة الصناعية، والتي كانت كحلول للعديد من المشاكل التي ظهرت أثناء عملية التحكم بهذه الأنظمة وخاصة فيما يتعلق بالروبوتات. ومع مرور الوقت لم يعد التحكم مقتصرًا على أجهزة مفردة فحسب، بل امتد ليشمل أنظمة متكاملة من العمليات الإنتاجية، واتخذ التطوير طريقين اثنين يتقاطعان في نقاط كثيرة، أولهما يعمل على تطوير الخوارزميات التي تقود الأنظمة الصناعية، والثاني يتولى تطوير المعالجات والشرائح والدارات العملية التي تضمن تنفيذ تلك الخوارزميات على أنظمة متكاملة بأسرع زمن وأقل كلفة.

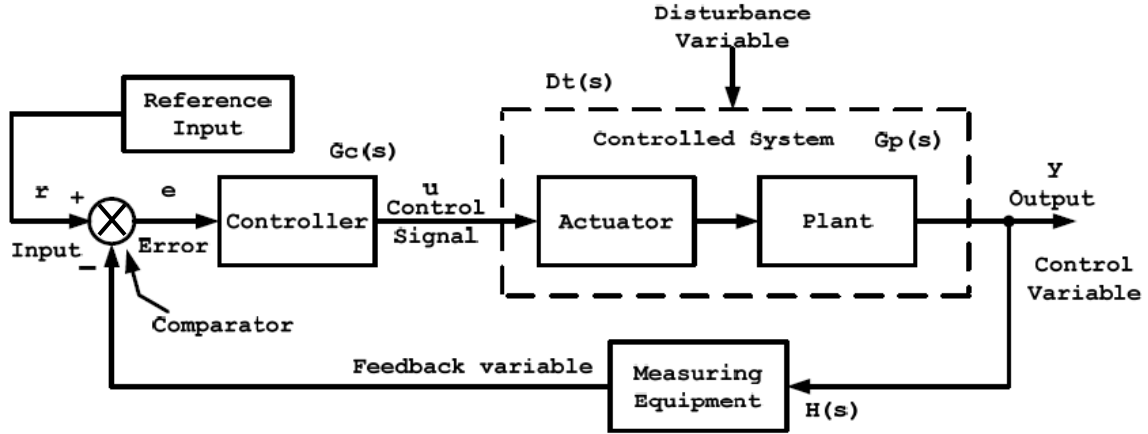
تمّ تصميم وتطوير الأنظمة الروبوتية متعددة الوظائف لمساعدة الإنسان أو النيابة عنه في انجاز المهام التي تكون مملة أو مستحيلة على الإنسان أو خطرة للغاية، حيث تمّ اقتراح عدد من الأبحاث في مجال الأذرع الروبوتية، وناقشت بعض المقالات العلمية التحليل الحركي والديناميكي للروبوتات الصناعية والتعليمية مثل PUMA 560 و SCARA و SG5-UT [3]، [4]، [5]، [6]. كما ناقشت مقالات أخرى مشاكل خوارزميات التحكم مثل PID و FLC وتقنيات أخرى [7]، [8]، [9]، [10].

في البداية تمّ استخدام التحكم بموضع الذراع من نقطة إلى نقطة أخرى (Point-to-point) لأداء مهام بسيطة مثل:

- عمليات اللحام النقطي (spot welding) الذي يعتبر من أكثر تطبيقات الروبوت شيوعاً في الصناعة حيث يتم استخدام الروبوت مع التجهيزات المناسبة في تنفيذ لحام الأجزاء معاً.
- عمليات الالتقاط والتموضع (pick and place) حيث يلتقط الروبوت القطع ويضعها في المكان المطلوب.

ومع تزايد متطلبات الصناعة، ظهرت مهام أكثر تعقيداً مثل عمليات اللحام بالقوس الكهربائي (arc welding) والطلاء بالرش (spray painting) والتي كانت تتطلب تتبع مساراً مستمراً من قبل الروبوت، مما دفع إلى ايجاد النظريات الجديدة في التحكم اللاخطي مثل: (التحكم الصلب، الشبكات العصبونية، التحكم بالأنماط المنزقة والتحكم التكييفي) وهذا ما أتاح للروبوت تنفيذ تلك المهام.

نتيجة التطور الكبير في نظريات التحكم، سمح ذلك بتصميم روبوتات تقوم بأدوار مهمة في العديد من التطبيقات كالروبوتات المتنقلة أو الجراحية أو روبوتات تحت الماء وغيرها. يتكون نظام التحكم في الحلقة المغلقة من مجموعة مكونات أساسية كما يظهر في (الشكل 1-2).



الشكل 1-2: مخطط عام لنظام تحكم بحلقة مغلقة

يتكون من المدخلات المرجعية  $r(t)$ ، الجامع، المتحكم  $G_c(s)$ ، النظام المراد التحكم به  $G_p(s)$ ، حساس  $H(s)$  يقيس قيمة خرج النظام  $y(t)$ ، وحلقة التغذية الراجعة. النظام يتكون من المفعلات، علب السرعة والتصميم الميكانيكي للنظام (مثل ذراع روبوت). يقوم المتحكم بمعالجة إشارة الخطأ  $e(t) = r(t) - y(t)$  لتزويد النظام بدخل مناسب بهدف تعديل تصرفه وتحسين خصائص استجابة الحلقة المغلقة، وقد تتأثر إشارة الخرج ببعض المدخلات الغير متوقعة مثل الاضطرابات  $D_s(t)$ .

يُعد المتحكم PID حلاً بسيطاً وفعالاً للعديد من مشكلات التحكم وهو الأكثر شيوعاً من بين خوارزميات التحكم، ويعود أول تطبيق لهذا المتحكم إلى أوائل القرن العشرين، تم استخدام هذا المتحكم في أكثر من 90% من حلقات التحكم [11]، كما حظيت هذه الخوارزمية بالكثير من الاهتمام بهدف تحسين أدائها كإيجاد قواعد لضبط معاملاتها، فيمكن تقسيم هذه الخوارزمية إلى نوعين: النوع الأول متحكم PID بمعاملات يتم ضبطها وتبقى ثابتة أثناء عملية التحكم، وبالتالي فهي غير قادرة على التحكم بفعالية بالأنظمة ذات المعاملات المتغيرة مع الزمن. أمّا النوع الثاني فإنّ معاملاته يمكن جدولتها عند نقاط تشغيل مختلفة للنظام (نظام خطي عند نقاط تشغيل محددة) [12]، لكن هذين النوعين يعتمدان على إيجاد نمذجة دقيقة للنظام الديناميكي ومعرفة كاملة بالمعاملات الديناميكية. تمّ فيما بعد تطوير خوارزميات أكثر تقدماً قادرة على التكيف مع المؤثرات الخارجية (الاضطرابات) ولا تتطلب النموذج الرياضي الدقيق للنظام كالتحكم التكيفي الذي يختلف عن التحكم التقليدي بأنّ معاملات التحكم تكون متغيرة بمرور الزمن، حيث يتم ضبطها بناءً على إشارات نظام الحلقة المغلقة، باستخدام هذا التحكم يمكن الوصول إلى الهدف المرغوب حتى لو تعرضّ النظام لتعديلات أو اضطرابات خارجية.

تمّ تطوير وعرض النمذجة الرياضية والتحكم والمحاكاة لذراع روبوت باستخدام النموذج الرياضي بالاعتماد على مجموعة من المعادلات التفاضلية اللاخطية من الدرجة الثانية [13]، والتي تم الحصول عليها باستخدام معادلات أولر-لاغرانج لإجراء المحاكاة الديناميكية. تمّ تنفيذ خوارزمية PID في النموذج وتطوير نموذج المحاكاة بمساعدة برنامج MATLAB/SIMULINK للتحقق من أداء النظام. وفقاً لتحليل النتائج، تمّ التحكم بذراع الروبوت للوصول إلى موضع زاوية المفصل المطلوبة. أظهرت النتيجة أيضاً أنّ التغييرات في مواضع زاوية المفصل أدت إلى حدوث أخطاء كبيرة في الاستجابة وهذا استلزم تعديل مكاسب المتحكم PID لمنع حدوث التجاوز والاهتزازات، وبذلك تمّ التحكم بذراع ذات درجتي حرية بدمج المتحكم PID مع تقنية جدولة الربح gain-Scheduled من أجل جميع نقاط التشغيل المحددة ضمن مجال عمل الذراع، للتحكم بموضع كل مفصل على حدى.

كما يُعد تتبع المسار عالي الدقة مع معدل مناسب من التغيير في السرعة موضوعاً صعباً للغاية في التحكم المباشر في قيادة الروبوت. يرجع هذا التحدي إلى اللاخطية في الأذرع الروبوتية. حيث استخدمت طريقة الخطية للحصول على نموذج خطي لكل مجموعة من نقاط التشغيل على طول المسار، ومن ثم تم الدمج بين النماذج الخطية بناءً على تقنية جدولة الربح. بمقارنة النتائج بمدخلات مسار مختلفة لضمان متانة وأداء المتحكم. أظهر هذا النهج تصميماً بسيطاً ونتائج جيدة وأداء عالي في تتبع أي مسار مقارنة بالأبحاث السابقة الأخرى [14].

تمّ استخدام Robotics Toolbox لإنشاء نموذج ذراع الروبوت للتحكم بها عن طريق تصميم متحكم ترجيحي باستخدام برنامج MATLAB، كما تمّ تصميم المتحكم PD وتحسين أدائه من خلال ضبط معاملاته  $K_p$ ،  $K_d$  عن طريق المتحكم الترجيحي وقد أظهرت النتائج تحسن ملحوظ لأداء هذا المتحكم وتقليل خطأ تتبع المواضع المرجعية المرغوبة [15].

تمّ استخدام المتحكم PID لمقارنة نتائجه بنتائج المتحكم المنطقي الترجيحي FLC والمتحكم الإشرافي FSC. وقد تمّ تطبيق المتحكم FLC نظراً لعدم خطية ذراع الروبوت، كما تمّ تصميم المتحكم FSC الذي يجمع بين كلا المتحكمين السابقين ويهدف إلى ضبط معاملات المتحكم PID تحت إشراف المتحكم FLC. وأظهرت نتائج المحاكاة أنّ استخدام كل من المتحكمين FLC و FSC يعطي نتائج جيدة مقارنة بالنتائج التي تمّ الحصول عليها باستخدام المتحكم PID [16].

استخدمت خوارزمية التحكم بالأنماط المنزلقة (sliding mode control) التي تعد إحدى منهجيات التحكم اللاخطية لقدرتها على حل أهم الموضوعات الصعبة في التحكم التي تتمثل بالاستقرار والصلادة. تُستخدم على نطاق واسع إلا أنّ لديها بعض العيوب منها مشكلة التذبذب التي يُمكن أن تحدث عند الترددات العالية لخرج المتحكم وبالتالي تُسبب ارتفاع درجة حرارة بعض الأجزاء الميكانيكية، تُعد الحساسية الكبيرة للضجيج مشكلةً رئيسية أمام الحصول على أداء جيد. اعتمدت في العديد من الأبحاث [17]، [18]، [19]، [20] حيث تمّ تصميم نظام التحكم بالأذرع الروبوتية باستخدام خوارزمية التحكم بالأنماط المنزلقة. أظهرت نتيجة محاكاة الروبوت PUMA 560 باستخدام هذه الخوارزمية أداء صلد مع وجود الارتياحات في نموذج الروبوت والاضطرابات الخارجية.

تمّ اقتراح استراتيجيات متعددة للتعامل مع مشكلة تتبع مسار لذراع روبوت بدرجتي حرية باستخدام الشبكات العصبونية (artificial neural network)، حيثُ أثبتت نتيجة المحاكاة لهذه الخوارزمية قدرتها على تقليل خطأ الحالة المستقرة حتى بوجود الاضطرابات الغير مرغوبة إذ أنها تعتبر أحد الحلول لمشكلة تتبع المسار للأذرع الروبوتية مع أو بدون النموذج الرياضي، الأمر الذي يجعله متحكم فعّال لمشكلة تتبع مسار للأذرع الروبوتية على اختلاف درجة حريرتها [21]. وكما دُمجت هذه النظرية مع نظرية المنطق الترجيحي [3] من أجل تتبع المسار المطلوب بدقة وإلغاء الاهتزازات إلى أقصى حد.

تمّ تطبيق تقنية أخرى للتحكم بذراع روبوت ذي درجتي حرية، والتي تتضمن إيجاد النموذج الخطي للنموذج الديناميكي اللاخطي في برنامج MATLAB باستخدام linearization control بعد ذلك بناءً على النموذج الخطي الذي تمّ الحصول عليه، تمّ تطوير المتحكم التنبؤي MPC الذي يسمح بالتنبؤ بكيفية تصرف النظام في المستقبل ويتم استخدامه بفعالية كبيرة في العمليات المعقدة ويتميز بوجود معاملات خاصة يتم ضبطها بشكل تحليلي عن طريق خفض تابع

الكلفة من أجل تنفيذ سلوك معيّن لنظام الحلقة المغلقة [22]. من أجل إثبات فعالية النهج المقترح، تمّ القيام بدراسة مقارنة هذا النهج مع نهج التحكم LQ، أظهرت النتائج أنّ نهج التحكم MPC المقترح يعطي أداءً أفضل للنظام من نهج التحكم LQ. بالإضافة إلى ذلك، كلا النهجين المقترحين يعطي أداءً أفضل للنظام من تقنية التحكم PID التي اقترحها [23 David & Robles]. من أجل تسهيل دراسة النظم الميكاترونية ميكانيكياً وتحكمياً تمّ استخدام إحدى تقنيات النمذجة التشاركية في هذا المجال، والتي تستند على برنامجي  $ADAMS^{\circledR} / MATLAB-SIMULINK^{\circledR}$  حيث يتم بناء التصميم الميكانيكي ثلاثي الأبعاد للنظام الميكانيكي في بيئة CAD ومن ثم تصديره إلى بيئة  $ADAMS^{\circledR}$  وبناء النموذج الافتراضي بدلاً من استخدام نموذج رياضي مبسّط (معادلات ديناميكية) للنموذج الميكانيكي، حيث أنّها تُساعد على خفض التكاليف وتؤمن الإدارة الفعّالة لوقت التصنيع وتزود المصمم برؤية واسعة لسلوك النظام. يتم تعريف مدخلات ومخرجات التحكم بالنظام في بيئة  $ADAMS^{\circledR}$  وإرسالها إلى بيئة  $MATLAB^{\circledR}$  ليتم بناء خوارزميات التحكم التي تحدثنا عنها سابقاً لدراسة أداء النموذج مع مُختلف خوارزميات التحكم [24]. هذه التقنية فعّالة جداً من حيث تخفيض التكلفة وتحسين كفاءة النظام الكهروميكانيكي. كما تمّ استخدامها مع العديد من الأبحاث [25]، [26]، [27].

### 3.2. لمحة تاريخية عن المتحكم PID

تمّ تسمية هذا المتحكم PID نسبةً لمصطلحات التصحيح الثلاثة ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) والتي يُقصد بها بالترتيب: المتحكم التناسبي (Proportional) والتكاملي (Integral) والتفاضلي (Derivative). في عام 1788، قام جيمس وات James Watt بوضع أول حلقة تحكم عكسية على محرك بخاري وكانت تحتوي متحكم تناسبي فقط. كما استخدم المتحكم التناسبي أيضاً لضبط سرعة حركة الكرة الطائرة من خلال تطبيق المزيد من البخار على المحرك عندما تنخفض السرعة أقل من قيمة محددة، والعكس صحيح.

في عام 1930، قدّمت شركة Taylor Instrumental أول وحدة تحكم تعمل بالهواء المضغوط باستخدام متحكم تناسبي قابل للضبط. ومع ذلك، فإنّه ليس كافٍ للتحكم بالسرعة بالشكل المطلوب، لأنّه يتسبب بتضخيم الخطأ فينتج خطأ غير صفري يسمى خطأ الحالة الثابتة (Steady State Error). حوالي عام 1933، اكتشف مهندسو التحكم أنّه يُمكن التخلص من خطأ الحالة الثابتة بإضافة حد تكاملي مع المتحكم التناسبي، فحصلوا على متحكم تناسبي تكاملي PI.

في 1934-1935، قدّم فوكسبورو Foxboro أول متحكم PI. ولكن هذا المتحكم PI لم يكن حلاً نهائياً لأنّه يتسبب أحياناً بعدم استقرار الحلقة المغلقة أثناء تصحيح الأخطاء. في عام

1938، كان هناك اقتراحات لإدراج معدّل تغيير الخطأ Kd بالاقتران مع وحدة التحكم PI. في عام 1940، انتجت شركة تايلور أول جهاز تحكم هوائي يستخدم المتحكم PID ومع ذلك لم يتم حل مشكلة تحديد القيم المناسبة لمعاملات المتحكم PID. في عام 1942، قدّم زيغلر ونيكولاس من شركة تايلور قواعد ضبط عُرفت بقواعد "Ziegler-Nichols" في ورقتهم المعروفة "Optimum settings for automatic controllers" وكانت تتضمن إجراءات لتحديد القيم المناسبة لمعاملات المتحكم PID. ومع ذلك، لم يكن المتحكم PID شائعاً في ذلك الوقت. في منتصف خمسينات القرن العشرين، تمّ اعتماده على نطاق واسع في الصناعات وبعد عدة سنوات تمّ اكتشاف امكانية بناء هذا المتحكم PID باستخدام العناصر الالكترونية والتي أصبحت أكثر شيوعاً منذ ذلك الحين.

#### 4.2. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID

يُعتبر من أكثر تقنيات التحكم المستخدمة في مجال الروبوت نظراً لبساطته وسهولة تنفيذه، حيثُ يقوم بتصحيح الأخطاء المتولدة عن الفرق بين القيم المرغوبة وإشارات المتغيرات المقاسة على خرج النظام، إنّه يتألف من جزء تناسبي (P)، جزء تكاملي (I)، جزء تفاضلي (D). يُعطي هذا المتحكم خرجاً محدد أ بالعلاقة الرياضية:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2-1)$$

حيث أنّ:

$u(t)$ : تُمثّل إشارة خرج المتحكم.

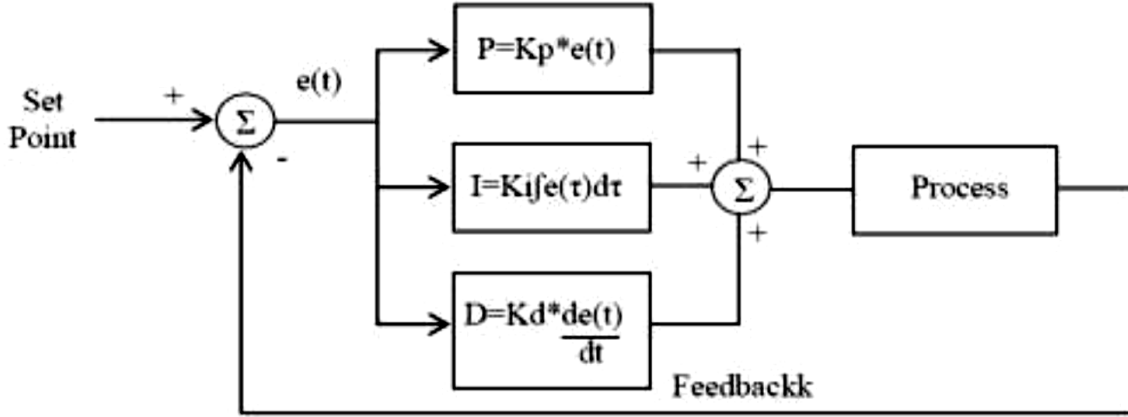
$e(t)$ : تُمثّل إشارة الخطأ المقاسة.

$K_p$ : يُمثّل ثابت الربح التناسبي.

$K_i$ : يُمثّل ثابت الربح التكاملي.

$K_d$ : يُمثّل ثابت الربح التفاضلي.

نجد من العلاقة السابقة أنّ المتحكم يتألف من ثلاثة مراحل منفصلة موضحة (الشكل 2-2)، وخرجه يُمثّل حاصل جمع المراحل الثلاث السابقة. كما يُمكننا تفعيل/إلغاء تفعيل أي مرحلة من المراحل بجعل الثابت الخاص بهذه المرحلة مساوٍ للصفر، مما يخلق تشكيلات مختلفة من هذا المتحكم مثل المتحكم التناسبي التكاملي (PI) أو التناسبي التفاضلي (PD):



الشكل 2-2: المخطط الصندوقي للتحكم PID

يُخلص (جدول 1-2) أثر كل معامل من معاملات المتحكم PID على استجابة الحلقة المغلقة في المجال الزمني [28]:

جدول 1-2: أثر معاملات المتحكم PID على استجابة الحلقة المغلقة في المجال الزمني

Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State Error	Stability
$K_p$	Decrease	Increase	Small Change	Decrease	Worse
$K_i$	Decrease	Increase	Increase	Eliminate	Worse
$K_d$	Minor Change	Minor Change	Minor Change	No Change	If $K_d$ small better

## 5.2. طرق ضبط معاملات المتحكم PID

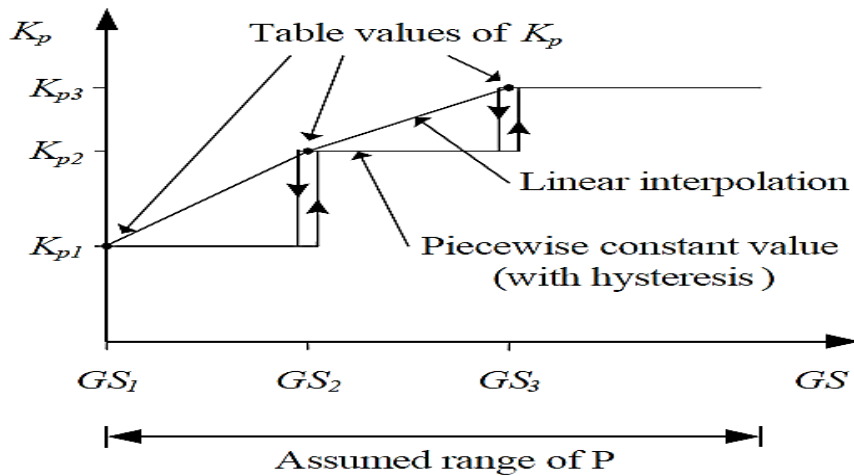
يُقصد بعملية الضبط تعديل معاملات المتحكم PID الثلاث من أجل الوصول إلى قيم مثلى ينتج عنها الاستجابة المرغوبة للنظام المراد التحكم به، يعد الاستقرار شرط أساسي فيها. هناك عدة طرق لضبط معاملاته مثل الطريقة التقليدية Z-N [29] وهي طريقة فعّالة جداً للتحكم بالأنظمة الخطية غير المتغيرة مع الزمن كما يمكن استخدامها مع الأنظمة اللاخطية والمتغيرة مع الزمن بشرط إيجاد النموذج الخطي لهذه الأنظمة حول نقطة عمل معيّنة، عندها يمكن تصميم متحكم ملائم بالاعتماد على الطريقة السابقة أو طريقة الضبط اليدوية، يكون قادراً على العمل بشكل جيد فقط في منطقة محددة حول هذه النقطة. ولتحقيق ذلك تم إضافة تقنية جدولة الربح إلى هذا المتحكم لتحديد قيم معاملاته المناسبة للتحكم بكل نموذج خطي مرتبط بمجال معيّن من مجالات التشغيل مما يجعل تصميم هذا المتحكم عملياً أكثر في التطبيقات الحقيقية، وبالتالي نسمي المتحكم المستخدم عبارة عن PID متعدد النماذج (Multi-PID) Multiple Model PID. يتم اختيار مجموعة من مجالات التشغيل بحيث تُغطي كامل مجال عمل النظام وتصميم متحكم PID مناسب

لكل منها، حيث يتم ضبط معاملات المتحكم من خلال مشاهدة استجابة النظام (الاستفادة من طريقة Z-N التقليدية عند كل مجال تشغيل). يتم تغيير قيمها حتى الحصول على استجابة النظام المطلوبة، يتم أولاً ضبط  $K_i$ ،  $K_d$  على الصفر. ثم زيادة  $K_p$  حتى يتأرجح خرج حلقة التحكم، بعد الحصول على قيمة مناسبة للربح التناسبي  $K_p$ ، يجب ضبطها على نصف هذه القيمة تقريباً. بعد ذلك، يتم زيادة  $K_i$  حتى يتم تصحيح أي إزاحة للخروج عن القيمة المرغوبة (إلغاء إشارة الخطأ). وأخيراً يتم زيادة  $K_d$ ، كي نحصل على استجابة أسرع في الوصول إلى القيمة المرغوبة. عادةً ما يتخطى خرج حلقة التحكم القيمة المرجعية المرغوبة عند ضبط معاملات PID (استجابة سريعة) ليعود إليها، إلا أن بعض الأنظمة لا تقبل حدوث التجاوز "overshoot" في استجابتها، وبالتالي عندها يلزم وجود حلقة تحكم مغلقة مضبوطة بشكل مفرط الأمر الذي سيتطلب ضبط قيمة  $K_p$  أقل من القيمة السابقة [30]. بعد ضبط القيم المناسبة لمعاملات المتحكم PID لكل مجال تشغيل، يجب تنظيمها ضمن جدول (lookup table) (جدول 2-2)، وأثناء عملية التشغيل يقوم النظام بالتبديل بين نماذج التحكم وفقاً للقيم الحالية لنقاط العمل مع الاحتفاظ بقيم هذه المعاملات ضمن مجال عمل محدد.

يُبين (الشكل 2-3) بالنسبة للربح التناسبي وينطبق هذا على الربحين الآخرين.

جدول 2-2: أرباح معاملات المتحكم PID بحسب مجالات العمل

$GS$	$K_p$	$K_i$	$K_d$
$P_1$	$K_{p1}$	$K_{i1}$	$K_{d1}$
$P_2$	$K_{p2}$	$K_{i2}$	$K_{d2}$
$P_3$	$K_{p3}$	$K_{i3}$	$K_{d3}$



الشكل 2-3: تغيير قيم المعامل التناسبي وفقاً لمجال تغيير العمل

## 6.2. لمحة تاريخية عن المنطق الترجيحي (Fuzzy logic)

المنطق الترجيحي، هو أحد فروع الذكاء الصناعي الذي يتعامل مع خوارزميات الاستدلال، المستخدمة لمحاكاة التفكير البشري واتخاذ القرار ضمن الآلة. قدّم البروفيسور لطفي زادة نظرية المنطق الترجيحي عام 1965، التي تقوم على مفهوم المجموعات الترجيحية. توفر نظرية المنطق الترجيحي، التي يقوم عليها هذا النمط من التحكم، وسيلة فعّالة لتمثيل الطبيعة غير الدقيقة للعالم الحقيقي فهي تسمح بمعالجة المتحولات غير المحددة تماماً وتتغير قيمتها في المجال  $[0,1]$ . لقد دفعت أعمال لطفي زاده حول النهج اللغوي وتحليل الأنظمة المبنية على نظرية المجموعات الترجيحية بعض الباحثين مثل ممداني Mamdani الذي كان أستاذاً في جامعة لندن، إلى تطبيق المنطق الترجيحي للتحكم بمحرك بخاري بشكل أوتوماتيكي في عام 1974 [31]، أي بعد عشر سنوات تقريباً من إيجاد هذه النظرية.

ثمّ في عام 1976، طوّرت شركة Blue Circle Cement وSIRA في الدنمارك تطبيقاً صناعياً للتحكم في حرق الاسمنت. بدأ هذا النظام في العمل في عام 1982. ثمّ تولى اليابانيون المهمة إذ قاموا بتطوير وتنفيذ العديد من التطبيقات الترجيحية الناجحة على نطاق واسع منذ الثمانينات بما بات لاحقاً يُعرف في اليابان بالانفجار الترجيحي Fuzzy Boom، إلى أن شمل حالياً كل المجالات (التطبيقات في المجال الصناعي والتحكم الآلي والمستشفيات والتعليم الأكاديمي) خاصة في مجال الروبوتات.

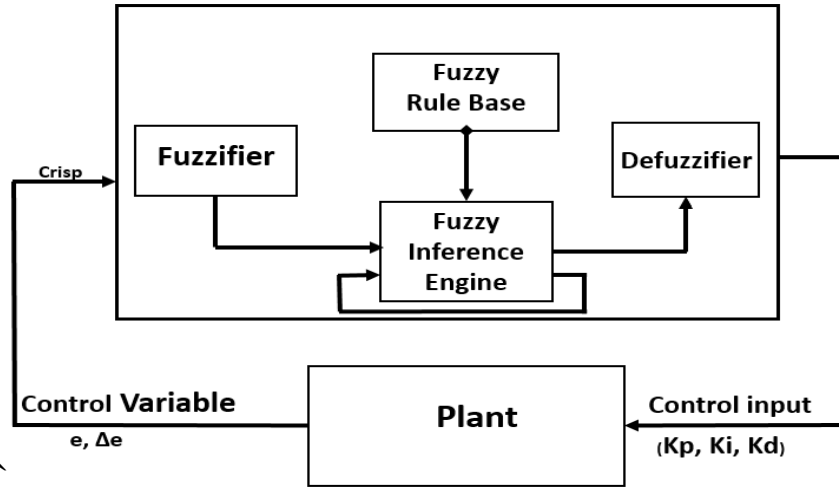
يُعد هذا المتحكم من أكثر التقنيات المستخدمة في مجال التحكم حيث يُستخدم بشكل خاص في العمليات اللاخطية [32]، إذا كان النموذج الرياضي غير موجود، وعند فهم كيفية عمل النظام بشكل عام. يمكن وصف المنطق الترجيحي ببساطة بأنه "الحوسبة بالكلمات بدلاً من الأرقام أو التحكم بالجمال بدلاً من المعادلات"، ويمكن الحصول على القواعد الترجيحية التي تُوصف النموذج الترجيحي عن طريق القياسات التي نحصل عليها من النظام نفسه أو من خلال نموذج مشابه له يتم محاكاته على الحاسب. وبالتالي فإنّ النموذج الترجيحي يُقدّم تمثيلاً أكثر واقعية للنظام إذ أنّه يُقدّم شرحاً لغوياً للنظام من خلال مجموعة من القواعد المنظمة، لذا تعد تقنية التحكم الترجيحية من أشهر التقنيات التي تستطيع ترجمة الخبرة البشرية إلى مجال التحكم.

## 7.2. بنية المتحكم الترجيحي Fuzzy Controller

يُوضّح (الشكل 2-4) المكونات الأساسية الأربعة للمتحكم الترجيحي [9]:

1. التعويم (Fuzzification): يحوّل قيم الدخل الواضحة (crisp data) إلى قيم ترجيحية fuzzy data عن طريق استخدام توابع الانتماء (MF) membership functions، حيث تمّ استخدام العديد من الأشكال لتوابع الانتماء الترجيحية.

2. بناء قاعدة الأوامر (RB) Rule-base: من الشكل If-Then التي تربط بين الدخل والخرج والتي تُمثل تحويل الوصف اللغوي إلى شكل منطق ترجيحي.
3. محرك (آلية) الاستدلال (Inference engine mechanism): يقوم باستخدام مبادئ المنطق الترجيحي لتحويل قواعد الأوامر إلى تقابل من مجموعة ترجيحية إلى مجموعة ترجيحية.
4. فك التعويم defuzzification: يحوّل استنتاجات محرك الاستدلال إلى قيم خرج عددية واضحة.



الشكل 2-4: مكونات نظام المنطق الترجيحي

## 1.7.2. التعويم Fuzzification

يعد التعويم الخطوة الأولى لتطبيق نظام الاستدلال الترجيحي. معظم المتغيرات الموجودة في العالم الحقيقي هي متغيرات واضحة أو كلاسيكية لذا نحتاج لتحويل هذه المتغيرات الواضحة (من المدخلات والمخرجات) للنظام إلى متغيرات ترجيحية، ثم تطبيق استنتاج ترجيحي لمعالجة هذه المتغيرات (المدخلات) للحصول على المخرجات المطلوبة.

تتضمن عملية التعويم بناء توابع الانتماء MF لمتغيرات الدخل والخرج وتمثيلها كمتغيرات لغوية (linguistic variable)، وبالتالي فإنّ هذه العملية تُعادل تحويل المجموعات الكلاسيكية (classical sets) إلى مجموعات ترجيحية (fuzzy sets) بدرجات متفاوتة.

## 2.7.2. المؤثرات الترجيحية

تسمح هذه المؤثرات بإجراء تراكيب مختلفة على المتحولات اللفظية بهدف الحصول على توصيف أمثل لظواهر حقيقية. بفرض أنّ  $x, y$  متحولين لفظيين مرتبطان بخطأ موضع ذراع الروبوت ومعدّل تغير خطأ الموضع على الترتيب وأنّ توابع الانتماء:  $\mu_A(x), \mu_B(y), \mu_O(z), \mu_E(z), \mu_C(z)$  وهي قضايا مرتبطة كمايلي:

$\mu_A(x)$ : خطأ الموضع الزاوي كبير،  $\mu_B(x)$ : معدل تغير خطأ الموضع كبير،  $\mu_E(x)$ : خطأ الموضع الزاوي كبير و معدل تغير خطأ الموضع الزاوي كبير،  $\mu_o(x)$ : خطأ الموضع الزاوي كبير أو معدل تغير خطأ الموضع الزاوي كبير،  $\mu_c(x)$ : خطأ الموضع الزاوي ليس كبير.

- المؤثر and: هو الحل الأبسط لتحقيق خاصيتين في آنٍ معاً ويمكننا أن نطلق عليه مؤثر التقاطع (intersection)، يؤدي إلى أخذ إحدى القيمتين (الصغرى) وفق المعادلة التالية وهو مؤثر تبديلي وتجميعي.

$$\mu_E(z) = \mu_{A \text{ and } B}(z) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2-2)$$

- المؤثر OR: بشكل موافق للمؤثر and يمكن اختيار المؤثر max على توابع الانتماء يطلق عليه مؤثر (union)، يؤدي إلى أخذ القيمة الكبرى وهو مؤثر تبديلي وتجميعي أيضاً وفق المعادلة التالية:

$$\mu_o(z) = \mu_{A \text{ or } B}(z) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2-3)$$

- المؤثر NOT: ندعوه بالمتعم أو العكسي (complement) فمثلاً إذا كانت زاوية التدوير كبيرة، فهو متمم القيم التي تكون عندها زاوية التدوير ليست كبيرة.

$$\mu_c(z) = 1 - \mu_A(z) \quad (2-4)$$

وفي بعض الأحيان يمكن استخدام تعريفات أخرى (استخدام التعليمات الحسابية "ضرب وجمع") من أجل تبسيط المعالجة الرقمية بحسب النظم المدروسة.

### 3.7.2 قواعد التحكم الترجيحية Fuzzy control rules

يمكن اعتبار قاعدة التحكم الترجيحية على أنها ناتجة عن الخبرة البشرية بحيث يتم إجراء تراكيب مختلفة على المتحولات اللفظية فيما بينها بواسطة قواعد وذلك للوصول إلى نتائج ما. تتمثل القواعد وفق الشكل If-Then، حيث يمثل الجزء If من القاعدة اللغوية شروط تتعلق بمتحول أو مجموعة متحولات لفظية (متغيرات الإدخال) بحيث ترتبط بمؤثرات AND, OR والجزء Then يمثل النتيجة (متغيرات الإخراج واحد أو أكثر). يمكن وصف طرق اشتقاق قاعدة الأوامر على النحو التالي:

- الخبرة البشرية (التجارب) ومعرفة هندسة التحكم.
- بناءً على إجراءات تحكم العملية.
- بناءً على نموذج غامض للعملية.
- بناءً على التعلم.

أشهر نوعين للنماذج الترجيحية هما النموذج اللغوي أو نموذج mamdani [33] والتي تُعطى قواعده بالشكل المبين بالمعادلة (2-5)، والنموذج العلائقي أو نموذج (TS) Takagi-Sugeno [34]، والتي تُعطى قواعده بالشكل المبين بالمعادلة (2-6)، حيثُ أن  $K$  تُمثل عدد القواعد الكلي و  $R^k$  تُمثل القاعدة رقم  $k$  و  $x$  تُمثل دخل النظام الترجيحي و  $y$  تُمثل الخرج، وكل من  $A^k$  و  $B^k$  هي مجموعات ترجيحية يُعبّر عنها بتتابع انتماء على الشكل التالي  $\mu_{A^k}(x): X \rightarrow [0,1]$  و  $\mu_{B^k}(y): Y \rightarrow [0,1]$  على الترتيب.

$$R^k: \text{IF } x \text{ is } A^k \text{ then } y \text{ is } B^k, \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (2-5)$$

$$R^k: \text{IF } x \text{ is } A^k \text{ then } y^k = f^k(x), \quad k = 1, 2, \dots, k \quad (2-6)$$

## 4.7.2. الاستدلال الترجيحي Fuzzy inference

تتعلق استراتيجيات التنظيم بشكل أساسي بالاستدلالات المعتمدة التي تربط المقادير المقاسة (متحولات الدخل  $x$  المحولة لمتحولات لفظية باستخدام التعويم) بمتحول الخرج  $x_{Res}$  والذي يُعبّر عنه بمتحول لفظي. في حالة التنظيم باستخدام المنطق الترجيحي نستخدم عادةً الاستدلالات، يمكننا التمييز بشكل عام بين نوعين من القواعد الاستدلالية:

1. استدلالات باستخدام قاعدة واحدة: تستخدم هذه الحالة عند الحاجة لمقارنة عدة أشياء أو أشخاص متنافسة في أمر معيّن، من أجل اختيار الأفضل بينها (الذي له أكبر قيمة لمعامل الانتماء).

2. استدلالات باستخدام مجموعة قواعد، إمّا يتم دمج القواعد للحصول على قاعدة واحدة، أو يتم معاملة كل قاعدة بشكل فردي ثم تُدمج النتائج تستخدم عند الحاجة لأخذ قرارات مختلفة بحسب قيم المتحولات اللفظية الترجيحية المختلفة وهي مناسبة لمشاكل التنظيم والتحكم.

هناك طريقتين لدمج القواعد:

- إذا كانت القواعد كعبارات شرطية مستقلة عن بعضها عندها يمكن استخدام معامل الاجتماع.

- إذا كانت القواعد كعبارات شرطية مرتبطة ببعضها (أي يجب تحقيق جميع الشروط) عندها يمكن استخدام معامل التقاطع.

هناك العديد من الطرق لإجراء الاستدلال الترجيحي على النحو التالي:

- Max-Min.

- Max-Algebraic Product.

- Max-algebraic sum.

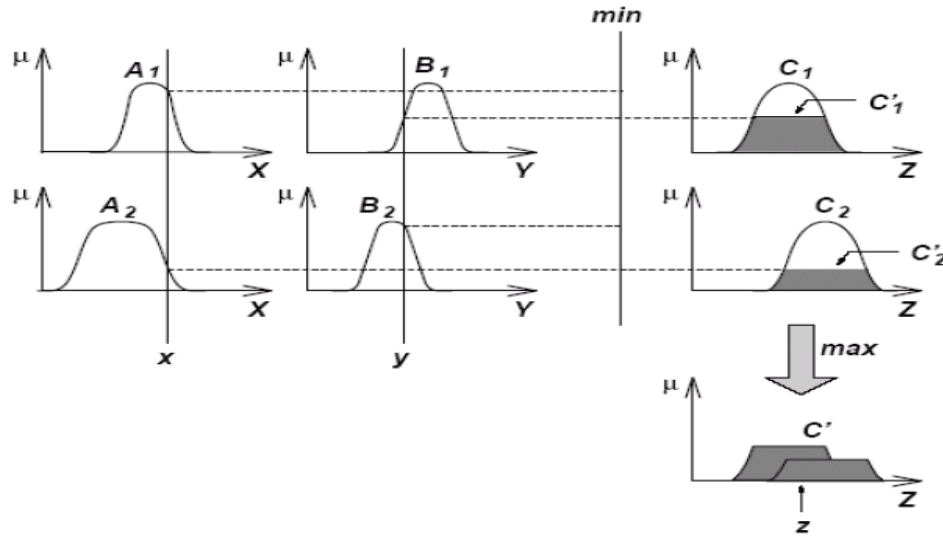
- .Max-Max
- .Min-Max
- .Max-bounded sum

مثلاً طريقة الاستدلال Max-Min ممداني: تستخدم هذه الطريقة الحد الأدنى كتضمين غامض لكل قاعدة وعامل الحد الأعلى لربط نتائج هذه القواعد (الشكل 2-5).  
نفترض أن قاعدة الأوامر تعطى بالشكل التالي:

$$R_i : \text{if } u \text{ is } A_i \text{ and } v \text{ is } B_i \text{ then } w \text{ is } C_i, i = 1, 2 \dots n$$

$$\text{For } u \in U, v \in V, \text{ and } w \in W. \quad (2-7)$$

$$\text{Then, } R_i = (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i$$



الشكل 2-5: طريقة Max-Min ممداني

## 5.7.2 فك التعويم Defuzzification

كما رأينا سابقاً تُعطي طرق الاستدلال تابع انتماء  $\mu_{Res}(X_R)$  لمتحول الخرج  $X_R$  وبالتالي فهي معلومة ترجيحية. وبما أن عنصر التحكم يتطلب إشارة تحكم  $U_{cmd}$  محددة على دخله لذا يجب تحويل المعلومة الترجيحية إلى معلومة محددة. نسمي هذه العملية بعملية فك التعويم. هناك مجموعة من الطرق المعتمدة من أجل فك التعويم وتتمثل بما يلي:

- فك التعويم باستخدام طريقة Center of gravity
- فك التعويم باستخدام طريقة Max membership
- فك التعويم باستخدام طريقة Center Average
- فك التعويم باستخدام طريقة Mean-max membership

تُعد طريقة حساب مركز الجاذبية الأكثر استخداماً وتعطى بالعلاقة التالية:

$$X^*_{Res} = \frac{\int_{-1}^1 X_R * \mu_{Res}(X_R) dx}{\int_{-1}^1 \mu_{Res}(X_R) dx} \quad (2-8)$$

حيث:

$X_R$ : يُمثل معامل تابع الانتماء  $\mu_{Res}(X_R)$

$X^*_{Res}$ : تُمثل إشارة الخرج التي لها قيمة محددة (قيمة عددية).

يتطلب حساب  $X^*_{Res}$  عمليات كثيرة وقدرة حسابية كبيرة خاصة في حالة التنفيذ في الزمن الحقيقي. حيث يتم حساب التكامل تحليلاً.

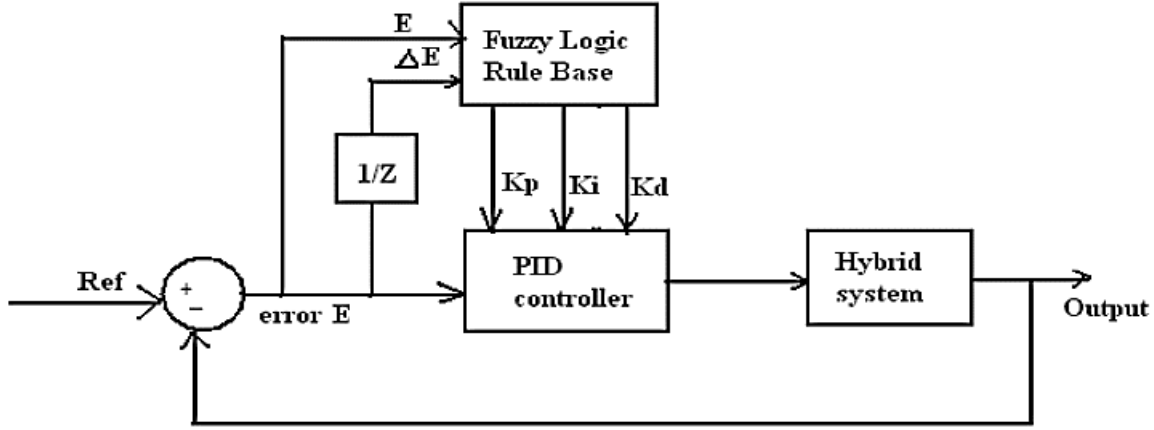
## 8.2. جدولة الربح التكيفي Fuzzy-PID controller

من التقنيات التوجيهية الحديثة التي حظيت مؤخراً باهتمام متزايد التقنية التي تعتمد على الدمج بين المتحكم التقليدي مثل PID مع المتحكم التوجيهي Fuzzy للحصول على طريقة جديدة وفعّالة تُسمى التحكم PID التوجيهي (FPID) حيث يتم ضبط معاملات هذا المتحكم تلقائياً بواسطة المنطق التوجيهي وفقاً للخطأ ومعدّل تغيره للحصول على أفضل أداء مناسب لتغيرات النظام اللاخطية.. إنّ استخدام ميزة إتخاذ القرار في المتحكم التوجيهي يُساهم في حل العديد من مشاكل المتحكم PID، مثل الحالات اللاخطية/ التعقيد في الأنظمة وحالات الغموض الناتج عن عدم دقة القياسات مثلاً، بحيث يقوم بضغط معاملات المتحكم PID بشكل أوتوماتيكي.

تُعتبر جدولة الربح طريقة فعّالة للتحكم في الأنظمة التي تتغير ديناميكيتها بشكل غير خطي مع ظروف التشغيل (Talaq and Basri 1999). في هذا العمل تمّ تصميم جدولة الربح التكيفي FPID من أجل التحكم بموضع ذراع روبوتية ذات درجتي حرية. تتميز جدولة الكسب هذه بالقدرة على تغيير معاملات وحدة التحكم بسرعة كبيرة وذلك استجابةً للتغيرات في ديناميكيات النظام لأنّه لا يتطلب تقدير المعاملات (Chang and Fu 1997). بالإضافة لكونها وحدة تحكم فعّالة للتعويض عن الاختلافات غير الخطية وغيرها من الاختلافات التي يمكن التنبؤ بها في ديناميك النظام، وهي أيضاً سهلة التنفيذ لابتعادها عن تعقيدات العلاقات الرياضية.

تمّ تطبيق مفهوم جدولة الربح التوجيهي لوحدة التحكم على معاملات وحدة تحكم PID التقليدية وفقاً للتغيرات في ظروف تشغيل النظام. يتم تعديل معاملات المتحكم PID بطريقة يتم فيها تكيف الأرباح لمعاملات المتحكم  $K_p$  و  $K_i$  و  $K_d$  عن طريق جدولة الكسب التوجيهي لظروف التشغيل (Kumar and Chanana 2010). يُغير المنطق التوجيهي لجدولة الربح التكيفي معاملات وحدة التحكم PID للحصول على أفضل أداء للتحكم في مجموعة واسعة من ظروف التشغيل.

يوضح (الشكل 6-2) بنية النظام الهجين (الدمج بين وحدتي تحكم)، يتكون من وحدتي التحكم PID و FLC.



الشكل 6-2: بنية المتحكم Fuzzy-PID

حيث يُعبّر  $E$  عن الخطأ بين الموقع المرغوب وإشارة خرج النظام،  $\Delta E$  هو معدّل التغير بالخطأ، يتم إرسال كل من القيمة ( $E$ ) ومشتقتها ( $\Delta E$ ) إلى وحدة التحكم الترجيحية ليتم حساب معاملات المتحكم PID وفقاً لقاعدة الأوامر RB باعتماد نموذج الاستدلال الترجيحي Mamdani الذي يوفر ربط غير خطي من الخطأ ومعدّل تغيره إلى معاملات PID التي تتعدّل قيمها باستمرار.

## 9.2. خوارزمية التحكم التنبئي Model Predictive Control

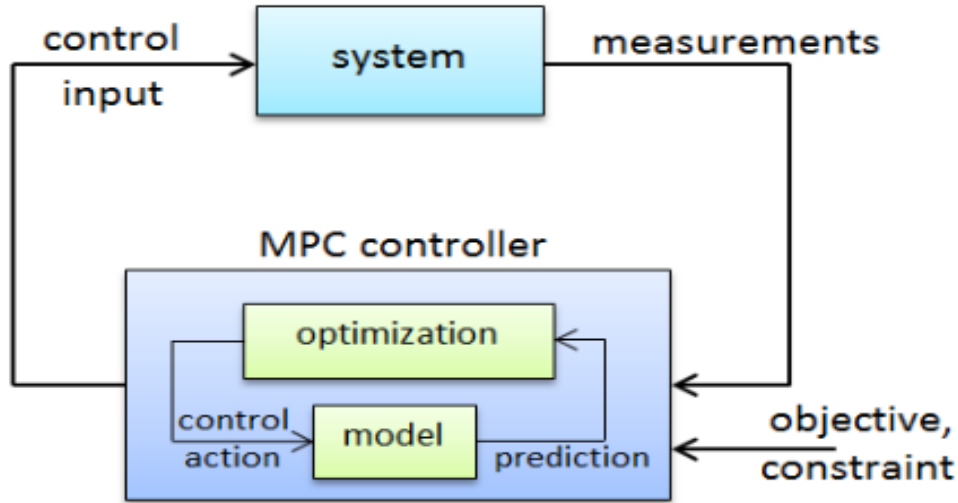
ظهر التحكم التنبئي المبني على النماذج الرياضية في الثمانينيات كطريقة للتحكم في العمليات الكبيرة والمعقدة للغاية، فهو استراتيجية تحكم مثالية، تختلف عن الخوارزميتين السابقتين بأنها تستخدم النموذج الديناميكي للنظام المراد التحكم به والذي يُعبّر عن كيفية تصرف النظام، بالإضافة إلى القياسات الحالية للنظام بهدف توقع السلوك المستقبلي للمتغيرات المتحكم بها. وبناءً على هذه التوقعات، يقوم المتحكم بحساب أفعال التحكم Control Actions مع مراعاة القيود المفروضة على متغيرات النظام وذلك بعد حل مشكلة الأمثلة في الوقت الفعلي. لذلك تعتبر النماذج أساسية لكل شكل من أشكال التحكم التنبئي، لأن حركة التحكم الأمثل تعتمد على الحالة الأولية للنظام الديناميكي.

في هذه الخوارزمية يتم إجراء تحسين الاستجابة عبر نافذة متحركة يُطلق عليها بأفق التنبؤ Prediction Horizon ( $N_p$ )، والذي يحدد المدى الذي يتم التنبؤ به للمستقبل. في كل مرة يتم حساب شعاع دخل التحكم الأمثل ( $\Delta u$ )، بهدف تقليل الفرق بين القيم المرجعية والنواتج المتوقعة على خطوات  $N_p$  لإيجاد التسلسل الأمثل/الأفضل لأفعال التحكم، يسمى هذا الشعاع بأفق التحكم

(Nc) Control Horizon). يتم تطبيق أول قيمة دخل من شعاع التحكم الأمثل، مع اهمال بقية القيم. يُطلق على هذا المبدأ Receding horizon control [35].

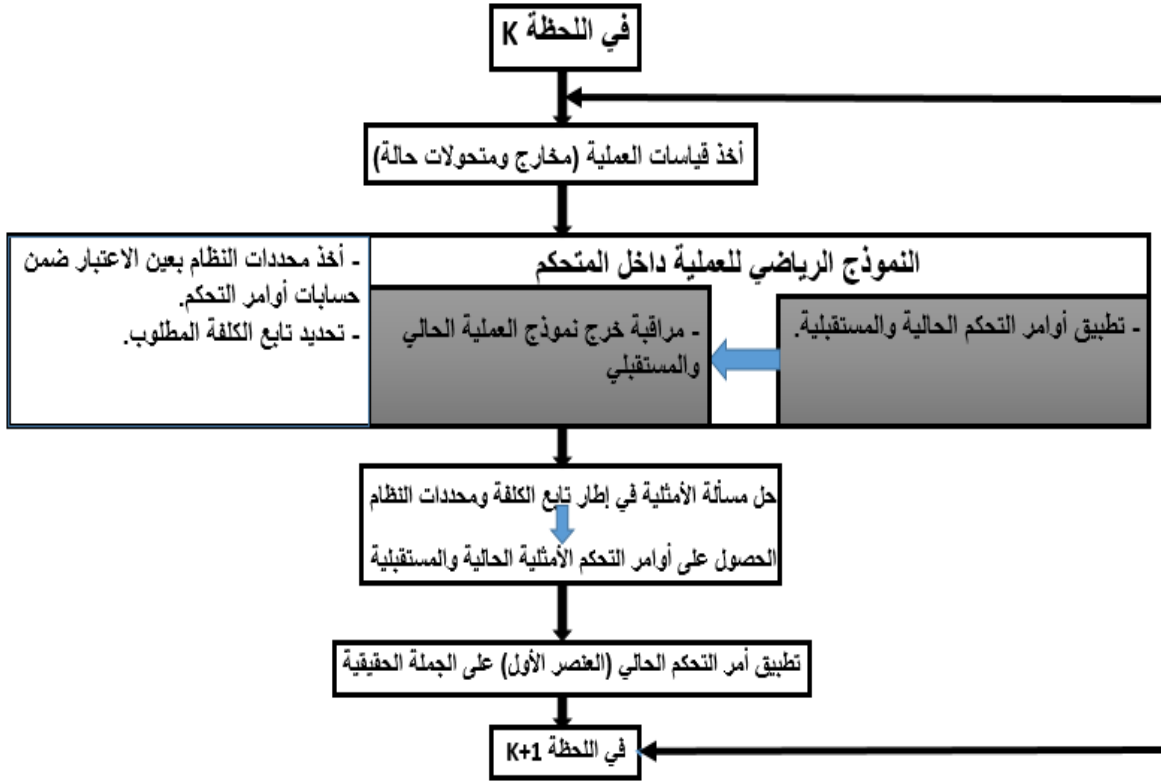
تتمثل المزايا الرئيسية للتحكم التنبئي في قدرته على التعامل مع أنظمة متعددة المداخل والمخارج (MIMO) Multi Input-Multi Output وقدرته على التعامل مع قيود متعددة للنظام أثناء عملية إيجاد دخل التحكم الأمثل أي الحصول على القيمة الأصغرية لتابع الكلفة وهو ما يعني ببساطة إعطاء أفضل أمر تحكم بأقل استهلاك لموارد النظام، مما يؤدي بشكل فاعل إلى السيطرة على حالات النظام ومنعها من تجاوز حدودها. بالإضافة إلى قدرته على التأثير على خصائص الاستجابة من خلال ضبط أوزان خرج النظام في تابع التكلفة، وتنفيذ القيود في كل خطوة زمنية. يمكن استخدام هذه الخوارزمية للتحكم بالأنظمة الخطية واللاخطية وتتميز بقدرتها على رفض الاضطرابات.

تتألف هذه الخوارزمية من ثلاث مكونات أساسية (الشكل 7-2) تتمثل بنموذج التنبؤ prediction model وتابع الكلفة Objective Function والقيود Constraints. تتضمن هذه الخوارزمية نموذج موجّه للتحكم (مُتنبئ predictor) يتنبأ بالسلوك المستقبلي للنظام خلال إطار زمني. يتم تقييم هذه التوقعات المستقبلية في مُحسِن بناءً على تابع التكلفة، يتم تطبيق أمر التحكم بواسطة المحسن على النظام لخطوة زمنية واحدة [35].



الشكل 7-2: المكونات الأساسية لخطة تنفيذ خوارزمية MPC

يُوضح (الشكل 2-8) خطوات تنفيذ هذه التقنية بشكل مفصّل



الشكل 2-8: خطوات تنفيذ الخوارزمية التنبؤية

## 1.9.2. مفاهيم أساسية

سنقوم بذكر المفاهيم الأساسية في خوارزميات التنبؤ.

### 1.1.9.2. الاعتماد على عملية التنبؤ

إنّ معظم تقنيات التحكم لا تأخذ بعين الاعتبار الحوادث المستقبلية التي يمكن أن تتعرض لها الجملة، على عكس المتحكمات التنبؤية التي تعتبر أنّ محاولة التنبؤ باستجابة النظام لأمر المتحكم لعدة خطوات مستقبلية، تُمكن المتحكم من الاختيار الأمثل للمسارات المرجعية التي سيستخدمها لإيصال الجملة إلى القيمة المرجعية المطلوبة.

### 2.1.9.2. عملية التنبؤ مبنية على نموذج الجملة

لكي تتمكن من التنبؤ بسلوك جملة ما في لحظة مستقبلية، يجب أن تمتلك نموذجاً رياضياً يصف عمل هذه الجملة. هذا النموذج يعطي الخرج المستقبلي كتابع للدخل الحالي أو المداخل المستقبلية. وبشكل نظري يمكن أن يأخذ هذا النموذج أي صيغة ممكنة (خطية أو لاخطية)، إلّا أنّه من الجدير بالذكر أن دقة النموذج الرياضي وبالتالي درجة تعقيده، يجب أن تتحدد بالغاية من هذا النموذج، إذ لا داعي لنماذج معقدة حين تؤدي النماذج البسيطة الهدف المرجو منها. وسبب

ذلك أنّ عملية تكرار الحسابات في كل لحظة من الفضاء الزمني المتقطع، يمكنها أن تتغلب إلى حد ما على أخطاء نموذج الجملة، لأن المتحكم يُجري عملية مقارنة دائمة بين الخرج الحقيقي للجملة والخرج المتوقع الناتج عن النموذج الرياضي، وأي اختلاف بين القيمتين يتم أخذه بعين الاعتبار عند حساب قيمة قانون التحكم.

في التطبيقات العملية يتم غالباً اعتماد النماذج الخطية، وذلك لأنّ هذه النماذج تُسهّل حل مشكلة الأمثلة، كما أنّها تُمكن من إجراء قسم من حسابات المتحكم بشكل مسبق (offline).

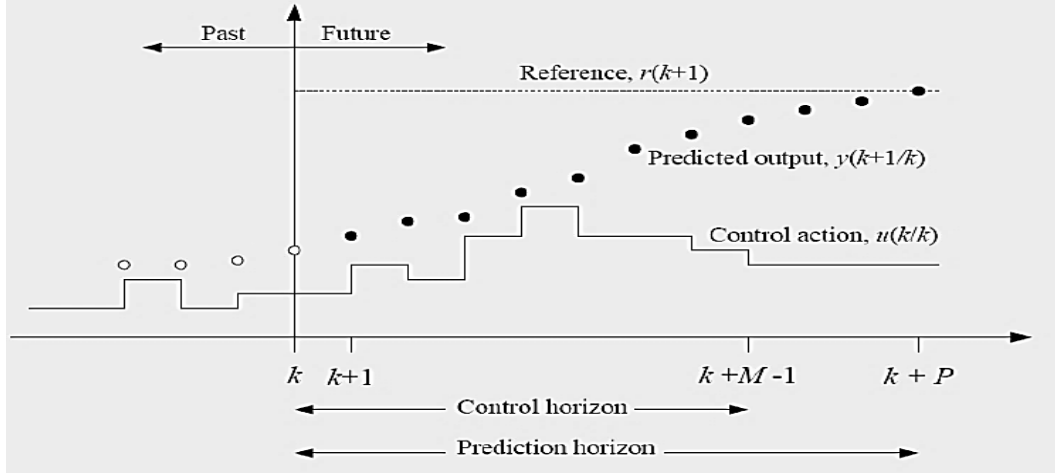
### 3.1.9.2. اختيار أمر التحكم الأمثل

يُعد اختيار قيمة معينة لقانون التحكم، عملية أساسية في التحكم التنبؤي، إذ أنّ التنبؤ بسلوك الجملة المستقبلي لا يكتسب معناه إلاّ عند الاستفادة منه في إيجاد أمر التحكم الأمثل الواجب تطبيقه. تعني الأمثلية في قانون التحكم أنّ المتحكم قادر على دفع الجملة لأفضل استجابة ممكنة بأقل استهلاك لموارد نظام التحكم. يعبر عن هذا الأمر في أوساط التحكم بما يسمى بالكلفة، بالتالي يكون أمر التحكم الأمثل بتقليل كلفة تنفيذ هذا الأمر، مع المحافظة على الأداء الجيد الناتج عن تطبيقه.

وبما أنّ بناء المتحكمات التنبؤية يعتمد على حسابات رقمية، لذا من الضروري أن يتوفّر تعريف عددي لحسابات قانون التحكم الأمثل الذي يتم صياغته من خلال عدة أشكال لتوابع رياضية بالاعتماد على محاكمات رياضية ومنطقية دقيقة [37]، واتخذت أشكالها المتباينة حسب طبيعة التحكم ومتطلباته، بحيث تُؤدي في النهاية غايتها في الحصول على أمر تحكم يضمن للجملة استجابة مثلى في نظام الحلقة المغلقة.

### 4.1.9.2. أفق التنبؤ

المتحكم التنبؤي يحدد مسافة رؤية ينظر من خلالها إلى ما يمكن أن يتخذه من قرارات مستقبلية، فمع كل لحظة زمنية ينسحب (يتقدم) الأفق الذي يقوم ضمنه المتحكم بحساباته للتنبؤ بالسلوك المستقبلي للنظام، أي كلما انقضت لحظة حالية أضاف المتحكم إلى قاعدة بياناته معلومات جديدة يستقيها من لحظة أكثر تقدماً من المستقبل المنظور بالنسبة له. كما يُوضّحه (الشكل 2-9). لكي نضمن الأداء الآمن للمتحكم يجب أن يكون طول أفق التنبؤ الذي يراه المتحكم يضمن استقرار النظام في نهاية المطاف وإلاّ كانت المعلومات التي يستمدّها المتحكم من سلوك النظام المستقبلي غير كافية لصياغة أمر التحكم المناسب. فإذا كان النموذج الرياضي للجملة أكثر دقة يمكننا ذلك من اختيار أفق تنبؤ أكبر بينما إذا كان النموذج لا يقدّم معلومات كافية عن أداء الجملة المستقبلي فليس منطقيّاً أن نختار أفق تنبؤ كبير.



الشكل 2-9: انسحاب أفق التنبؤ مع الزمن

### 5.1.9.2. المعايير

تتم معايرة المتحكم التنبؤي عن طريق مجموعة مصفوفات أوزان تُعطي فكرة عن أهمية كل متحول حالة وكل خرج، ليأخذ في حسبانته أن إيصال الخرج إلى قيمته المرجعية يُعد أولوية لنظام التحكم. في هذه المتحكمات عملية تصغير تابع الكلفة تؤدي إلى دفع المتحكم إلى درجة كافية من الاستقرار وجودة الأداء، ذلك أن القيمة الأمثل لتابع الكلفة هي دائماً القيمة الأصغر، وهذا لا يتغير بالنسبة لجميع المخارج على حد سواء، فلا بدّ من الموازنة بين ملاحقة كل خرج وكل متحول للقيم المرجعية المحددة، مما دفع الباحثين إلى اعتماد الأنظمة الواحدية للوصول إلى الهدف، أي إعطاء قيم للأوزان تتراوح بين الصفر والواحد وبالتالي الحصول على توزيع عادل لأهمية كل من هذه المتغيرات.

### 6.1.9.2. قيود النظام

تُعتبر هذه الميزة من أهم ميزات التحكم التنبؤي، وتتبع أهمية هذه الميزة من حقيقة أنه لا توجد أي عملية صناعية تخلو من قيود عديدة. قدرة هذا المتحكم على احتواء هذه القيود تمكنه من الوصول إلى أفضل أداء دون تجاوز أي حد خطر قد يضر النظام. يجدر بالذكر أن قيود الأنظمة تقسم بشكل عام إلى قسمين: قيود قاسية Hard constraint، وقيود غير قاسية Soft Constraint. فالقيود القاسية هي القيود التي لا يمكن للنظام بأي حال أن يتجاوزها، أما القيود اللينة فهي أقل إلزاماً من سابقتها، لكن هذا التساهل يجب أن يكون محدداً ولفترات زمنية قليلة تكفي المتحكم لإيجاد حلول رياضية لمعادلاته تكفل مراعاة قيود النظام جميعها المعبر عنها وفق المعادلة (قيود على الدخل والخرج).

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}, \quad u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (2-9)$$

### 7.1.9.2. النموذج المستخدم في المتحكم التنبئي

تُعد عملية النمذجة للجمل المراد التحكم بها عن طريق الخوارزميات التنبؤية من أهم العمليات التي تصادف المصمم عند بناء المتحكم التنبئي، لأن نموذج الجملة هو المرجع الوحيد للمتحكم للتنبؤ بسلوك الجملة المستقبلي. بالتالي قدرة المتحكم على توقع الأخطاء وتفاديها متعلقة بقوة النموذج الرياضي المستخدم، وكما أنّ مشاكل النماذج الممثلة لأنظمة التحكم لا تقتصر على عدم الخطية، بل تظهر عوامل مؤثرة أخرى كإشارات الضجيج التي تتعرض لها الجملة، سواء على مستوى الضجيج المتعلق بإشارات التحكم نفسها، أو الضجيج الناتج عن القياسات. هذه المؤثرات يتم التعامل معها عن طريق إضافة بعض الحدود المعرفّة لهذا التشويش على نموذج الجملة المستخدم، وبمعرفة هذا التشويش نتمكن من التعامل معه. وأما ضجيج القياسات فتستخدم مرشحات لها.

#### 1.7.1.9.2. التنبؤ باستخدام معادلات الحالة:

نموذج النظام المستخدم (محركي DC، وذراع روبوتية بدرجة حرّية) في هذا العمل يعتمد على معادلات الحالة التي تتميز بسهولة التعامل معها ضمن الأنظمة متعددة المداخل والمخارج، إنّ استخدام المعادلات في التنبؤ بسيط ومباشر، بالعودة إلى معادلة الخرج نجد أنّ الحصول على قيمة للخرج في اللحظة التالية يحتاج فقط إزاحة زمنية لمتحول الحالة لحظة واحدة إلى الأمام ليصبح النموذج على الشكل:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\y_{k+1} &= Cx_{k+1}\end{aligned}\quad (2-10)$$

وبناءً على هذا النموذج يمكن الآن إيجاد الخرج المتنبئ به في أي لحظة زمنية قادمة ففي اللحظة  $k+2$  يصبح النموذج:

$$\begin{aligned}x_{k+2} &= Ax_{k+1} + Bu_{k+1} \\y_{k+2} &= Cx_{k+2}\end{aligned}\quad (2-11)$$

وبتعبير قيمة  $x_{k+1}$  من (2-10) في (2-11) نجد أنّ:

$$\begin{aligned}x_{k+2} &= A^2x_k + ABu_k + Bu_{k+1} \\y_{k+2} &= Cx_{k+2}\end{aligned}\quad (2-12)$$

وبالتقدم لحظتين زمنيّتين نستطيع كتابة النموذج في اللحظة  $k+3$  اعتماداً على (2-12) بالشكل:

$$\begin{aligned}x_{k+3} &= A^2x_{k+1} + ABu_{k+1} + Bu_{k+2} \\y_{k+3} &= Cx_{k+3}\end{aligned}\quad (2-13)$$

وبتعويض قيمة  $x_{k+1}$  من (2-10) في (2-13) نجد:

$$\begin{aligned} x_{k+3} &= A^2[Ax_{k+1} + Bu_k] + ABu_{k+1} + Bu_{k+2} \\ y_{k+3} &= Cx_{k+3} \end{aligned} \quad (2-14)$$

كل ما سبق يقودنا إلى اشتقاق الخرج المتوقع به في أي لحظة  $n$  من المستقبل بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} x_{k+n} &= A^n x_k + A^{n-1}Bu_k + A^{n-2}Bu_{k+1} + \dots \\ &\quad + Bu_{k+n-1} \\ y_{k+n} &= Cx_{k+n} \\ &= C[A^n x_k + A^{n-1}Bu_k + A^{n-2}Bu_{k+1} + \dots \\ &\quad + Bu_{k+n-1}] \end{aligned} \quad (2-15)$$

وبالتالي يمكننا تشكيل كامل شعاع التنبؤ على مجال أفق تنبؤ  $n_y$  على الشكل:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ x_{k+3} \\ \vdots \\ x_{k+n_y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{n_y} \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} B & 0 & 0 & \dots \\ AB & B & 0 & \dots \\ A^2B & AB & B & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A^{n_y-1}B & A^{n_y-2}B & A^{n_y-3}B & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+n_y-1} \end{bmatrix} \\ x_{\rightarrow k} &\quad P_{xx} \quad \quad \quad H_x \quad \quad \quad u_{\rightarrow k-1} \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ y_{k+3} \\ \vdots \\ y_{k+n_y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{n_y} \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots \\ CAB & CB & 0 & \dots \\ CA^2B & CAB & CB & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{n_y-1}B & CA^{n_y-2}B & CA^{n_y-3}B & \dots \end{bmatrix} u_{\rightarrow k-1} \\ y_{\rightarrow k} &\quad P \quad \quad \quad H \end{aligned} \quad (2-17)$$

وباختصار

$$\begin{aligned} x_{\rightarrow k} &= P_{xx}x_k + H_x u_{\rightarrow k-1} \\ y_{\rightarrow k} &= Px_k + Hu_{\rightarrow k} \end{aligned} \quad (2-18)$$

### 8.1.9.2. تابع الكلفة Cost Function

إنّ تابع الكلفة قادر ضمناً على التعامل مع الأنظمة متعددة المداخل والمخارج وبالتالي لا بدّ من إضافة مصفوفات توزيع لكل من الدخل  $W_u$  والخرج  $W_y$  تساعد على توضيح أولويات

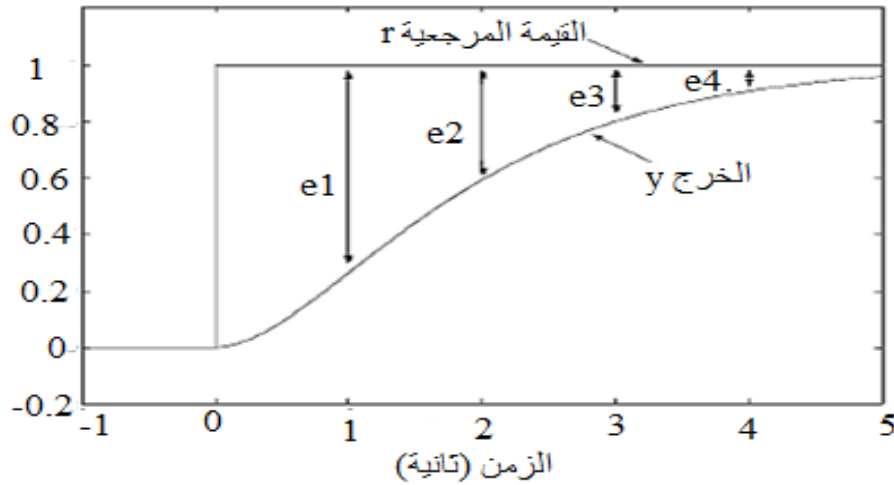
التحكم للمتحكم التنبؤي. تمثل القيمة الأمثلية لتابع الكلفة بأصغر قيمة ممكنة لها، ويُعطى هذا التابع على الشكل التالي:

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{i=n_w}^{n_y} \|W_y(r_{k+i} - y_{k+i})\|_2^2 + \sum_{i=0}^{n_u-1} W_u \|\Delta u_{k+i}\|_2^2 \\
 &= \sum_{i=n_w}^{n_y} \|W_y e_{k+i}\|_2^2 + \sum_{i=0}^{n_u-1} \|W_u \Delta u_{k+i}\|_2^2
 \end{aligned} \tag{2-19}$$

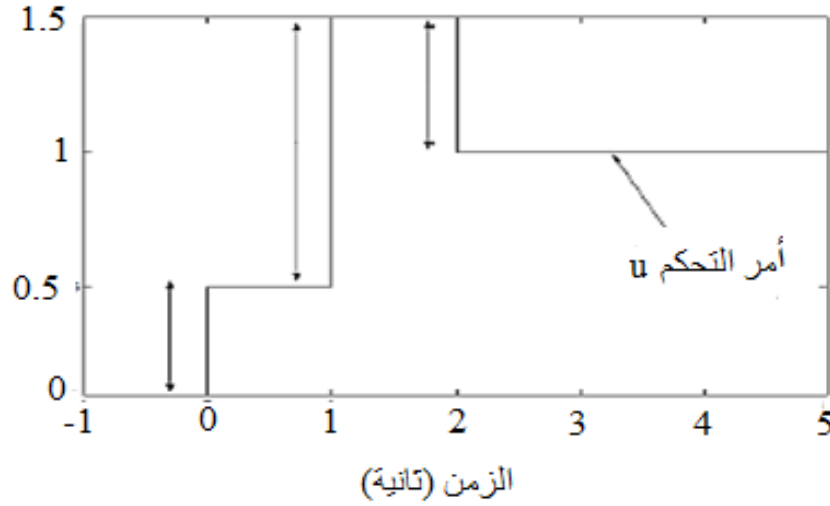
إن تابع الكلفة المستخدم يتألف من حدين:

- مجموعة مربعات الأخطاء المتوقعة للخروج المستقبلي عن القيمة المرجعية له، بين قيمة ما ابتدائية  $n_w$  وقيمة أفق التنبؤ  $n_y$  كما يوضح (الشكل 2-10)
- مجموع مربعات التغيرات في قيم الدخل ضمن فضاء التحكم  $n_u$  كما في (الشكل 2-11)، ويتم الافتراض أن قانون التحكم يحافظ على قيمته الأخيرة بعد انتهاء هذا المجال أي أن

$$\Delta u_{k+i} = 0, \quad i \geq n_u \tag{2-20}$$



الشكل 2-10: الأخطاء المتوقعة للخروج المستقبلي



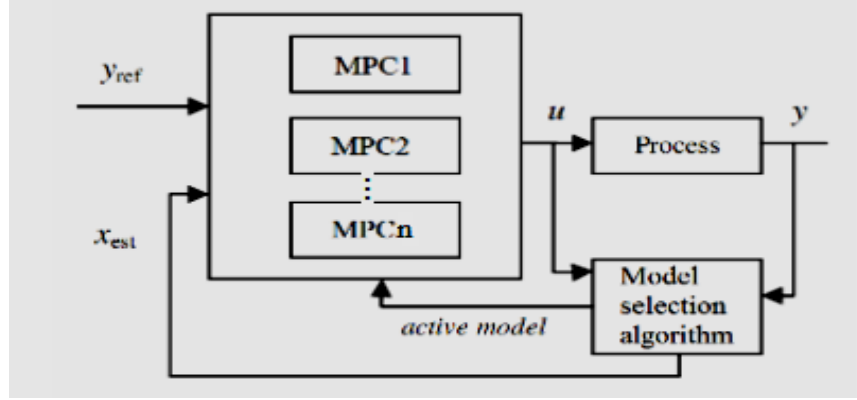
الشكل 2-11: قيم أمر التحكم ضمن فضاء تحكم طوله 3 عينات

إنَّ الهدف من تصغير تابع الكلفة أي أنَّ أصغر قيمة ممكنة لهذا التابع  $J = 0$  مرتبطة بعدم وجود إزاحة للخروج عن قيمته المرجعية، وهذا يعني أنَّ الخطأ صفري في اللحظات التالية وقانون التحكم ثابت على آخر قيمة له.

حساب القيمة الأمثلية لتابع الكلفة يتم على مجال محدد بأفق التحكم  $n_u$ ، ويأخذ بعين الاعتبار تغيرات أمر التحكم على طول هذا المجال وبعد إيجاد القيمة الأمثلية لتابع الكلفة يتم الاستفادة منها في حساب أوامر التحكم على طول أفق التحكم وتطبيق الأمر الأول على الجملة الحقيقية، ثم تكرر العملية في اللحظة الزمنية التالية.

## 2.9.2. التحكم التنبئي متعدد النماذج Multiple Model MPC

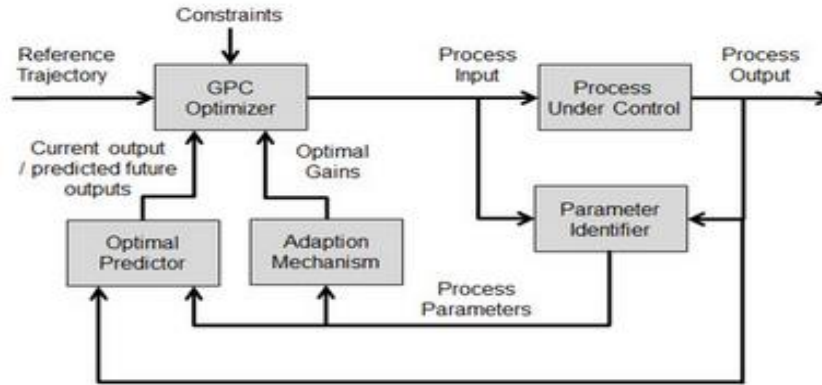
تُعتبر خوارزمية التحكم التنبئي متعدد النماذج، بأنها استراتيجية تحكم للأنظمة اللاخطية. تعتمد على إيجاد نماذج خطية متعددة لتقريب النظام اللاخطي من أجل تحقيق أفضل تحكم عندما تتغير ظروف التشغيل، وذلك بإجراء التحويل الخطي للنظام عند عدد من نقاط التشغيل بحيث تشمل كامل مجال عمل النظام، ثمَّ يتم بناء وحدة تحكم تنبئية قائمة على النموذج لكل نموذج خطي محدد للنظام. عندها تقوم وحدة التحكم تلقائياً بتبديل نموذج التنبؤ واختيار وحدة التحكم المناسبة عبر منفذ التبديل (switch) وفقاً لموضع النظام بالنسبة لنقاط التشغيل. يعد تبديل وحدات التحكم لمناطق التشغيل المختلفة نهجاً شائعاً لحل مشكلات التحكم اللاخطية باستخدام تقنيات التحكم الخطي (الشكل 2-12). يعتمد هذا المتحكم على مرشح كالمن (Kalman filter) الثابت بالرغم من أنَّ معاملات نموذج التنبؤ تتغير في وقت التشغيل بحسب حالة النظام.



الشكل 2-12: المخطط الصندوقي لنظام التحكم التنبئي النموذج متعدد النماذج

### 3.9.2. التحكم التنبئي التكيفي Adaptive-MPC

يعتمد هذا المتحكم على النموذج اللاخطي للجملة من أجل توليد جميع مصفوفات النماذج الخطية اللازمة خلال أفق التنبؤ وفقاً لنقاط التشغيل. وتتميز هذه الخوارزمية بأنها ذات تعقيد حسابي كبير مقارنةً بالمتحكم التنبئي متعدد النماذج. يوضح (الشكل 2-13) بنية المتحكم التنبئي التكيفي. يعتمد هذا المتحكم على مرشح كالمن الخطي المتغير بمرور الوقت (LTVKF) Linear Time Varying Kalman filter.

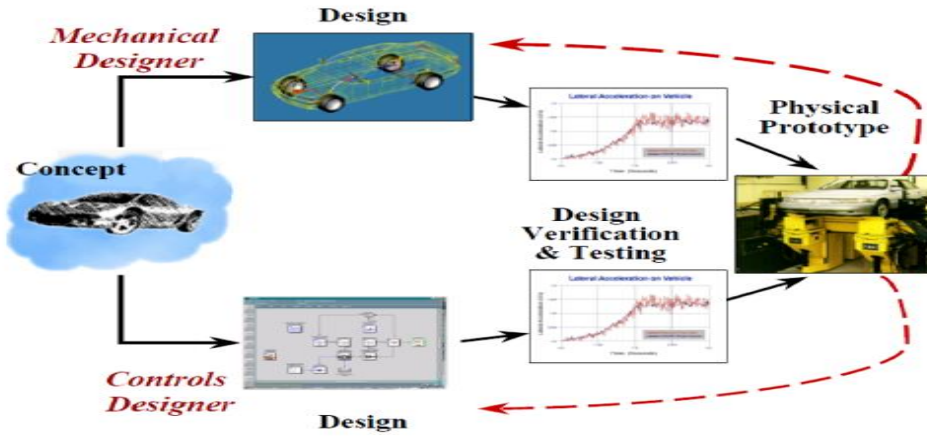


الشكل 2-13: بنية المتحكم التنبئي التكيفي

### 10.2. النمذجة التشاركية بين برنامجي MATLAB و ADAMS

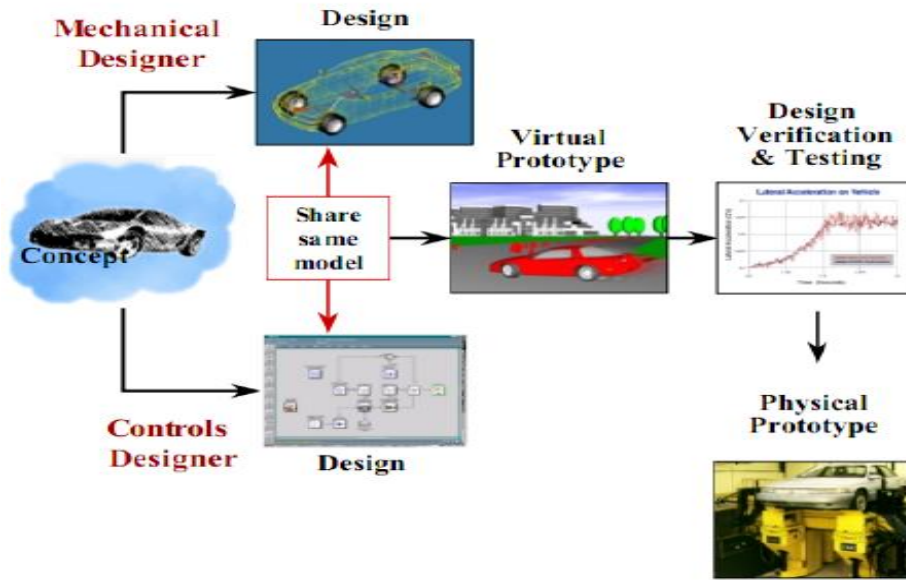
شهدت منهجيات تصميم الأنظمة الميكاترونية تقدماً تدريجياً تطلبه الحاجة إلى تصاميم معقدة، لتقليل الوقت المطلوب للتصميم والتصنيع، ودمج المجالات غير المتجانسة مثل الإلكترونيات والميكانيك والبرمجيات في منتج واحد. في المنظومات الميكاترونية، كان مهندسي الميكانيك يعملون على تطوير التصميم الميكانيكي ويقومون بتصنيعه ثم تسليمه إلى مهندسي التحكم لتجميع التحكم عليه وإجراء التجارب مما يتطلب في الكثير من الأحيان تعديلات على

التصميم الميكانيك والتحكم وبالتالي إعادة التصنيع وهذه العملية مكلفة وتحتاج لوقت ويُخلص (الشكل 2-14) الطريقة التقليدية للتصميم.



الشكل 2-14: الطريقة التقليدية لتصميم الأنظمة الميكاترونية

لحل مشكلة ضياع الوقت والتكلفة العالية لابد من وجود بيئة محاكاة متعددة المجالات والتي يمكن تحقيقها باستخدام النمذجة التشاركية، فهي ليست فقط محاكاة يؤديها اثنين أو أكثر من المجالات الفرعية والمختلفة، وإنما هي محاكاة تستخدم العديد من البرامج التي تعمل بالتوازي وتتبادل البيانات باستمرار للتحقق من سلوك كل مكون من المنتج تحت ظروف عمل محددة، حيث أنها تسمح لنا بتحرك المنظومة وتطبيق نظام التحكم كما يُؤخذ بعين الاعتبار الاحتكاك والجابية وغيرها من المعاملات، وبالتالي تكون قريبة من الواقع بنسبة كبيرة وبعد الانتهاء من الاختبار يتم إرسال التصميم للتصنيع. يوضح (الشكل 2-15) هذه الطريقة بالتصميم.



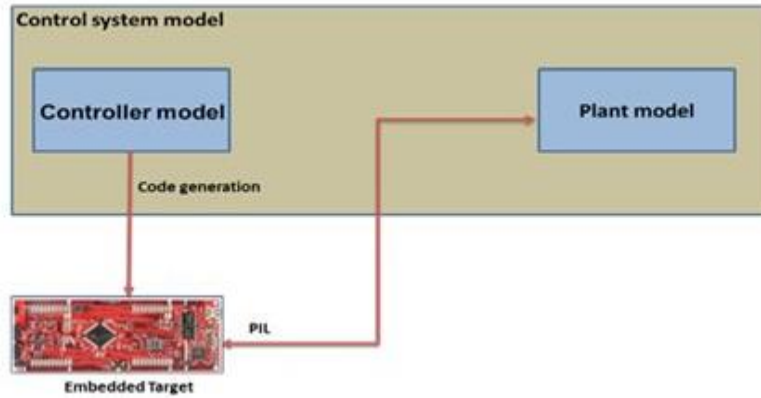
الشكل 2-15: تصميم الأنظمة الميكاترونية باستخدام النمذجة التشاركية

## 1.10.2. تعريف برنامج MATLAB

برنامج MATLAB (اختصار لكلمتي Matrix Laboratory) هو عبارة عن بيئة حوسبة رقمية متعددة النماذج ولغة برمجة خاصة تُسمى Matlab تمّ تطويرها بواسطة MathWorks، تمّ تحسينه لإجراء العمليات الحسابية الهندسية والعلمية فهو يسمح بمعالجة الصورة، رسم الوظائف والبيانات، الاتصالات، تصميم نظام تحكم "بناء خوارزميات التحكم"، النمذجة، وقدرته على التواصل مع البرامج المكتوبة بلغات أخرى والعديد من التطبيقات. واستخدام بيئة Simulink تمكّننا من نمذجة الأنظمة الديناميكية متعددة النطاقات ومحاكاتها وتحليلها وتؤمن واجهة تخاطبية لتصميم مرئي مرّن، حيث تحتوي على العديد من التوابع الأساسية. زوّد هذا البرنامج بحزمة دعم المحاكاة Simulink Support Packages من أجل تطوير ومحاكاة خوارزميات التحكم حاسوبياً وترجمتها آلياً لتصديرها إلى الحواسيب المصغرة لاحقاً من أجل تنفيذها بشكل مستقل. كما زوّد بتقنية Processing In the Loop (PIL) التي تفيد في تنفيذ الخوارزميات على الحواسيب المصغرة ضمن بيئة Simulink.

## 2.10.2. تقنية المحاكاة PIL

يقدم برنامج MATLAB تقنية المحاكاة Processor-In-Loop التي تسمح بعملية الترجمة الآلية لخوارزميات التحكم التي يتم تصميمها في بيئة MATLAB/Simulink وتصديرها إلى عدد كبير من الحواسيب المصغرة منها بطاقة "Raspberry-Pi and Arduino-Due" باستخدام أدوات code generation tools التي تسمح لنا بتوليد برنامج بلغة C/C++ على البطاقتين السابقتين بشكل أوتوماتيكي بدون الحاجة لكتابة البرنامج يدوياً، من أجل دراسة أزمنة التنفيذ وصحة الحسابات المنفذة على هذه البطاقات. (الشكل 2-16) يُوضّح عملية المعالجة للخوارزميات عند استخدام هذه التقنية ضمن حلقة التحكم.



الشكل 2-16: عملية المعالجة باستخدام تقنية PIL ضمن حلقة التحكم

تُعتبر المحاكاة PIL جزءاً حاسماً من دورة التصميم لأنها تُمكننا من اختبار النماذج المختلفة لخوارزميات التحكم للكشف عن مشاكل التنفيذ في البيئة المدمجة "الحواسيب المصغرة"، وتقييم قدرة وحدة المعالجة على تنفيذ خوارزميات التحكم من خلال تطابق أداء الخوارزميات في البيئة المدمجة مع أدائها في بيئة Simulink [38].

### 3.10.2. تعريف برنامج ADAMS

تُستخدم بيئة MSC ADAMS® في بناء النموذج الديناميكي للروبوت، هذه البيئة قادرة على تقديم نموذج افتراضي أكثر دقة لجميع الاحتكاكات الموجودة في المفاصل والتوضع الحقيقي لمركز ثقل الأذرع وتأثير الجاذبية الأرضية فهو يحاكي النموذج الفيزيائي. وتقدّم تحليلاً ستاتيكيًا وحركيًا وديناميكيًا لنموذج المنظومات متعددة الأجسام. ونظراً لتعقيد الدراسة الديناميكية للروبوت يعتبر استخدام هذه البيئة من أفضل الحلول للحصول على نمذجة حقيقية للمنظومة الميكانيكية. ضمن هذه البيئة يمكننا إضافة مجموعة من البرامترات مثل تسارع الجاذبية، نوع المواد المستعملة، وأيضاً إضافة القيود والروابط التي تربط أجزاء الروبوت لتنفيذ كل المهام المطلوبة.

### 11.2. الحواسيب المصغرة (mini-computer)

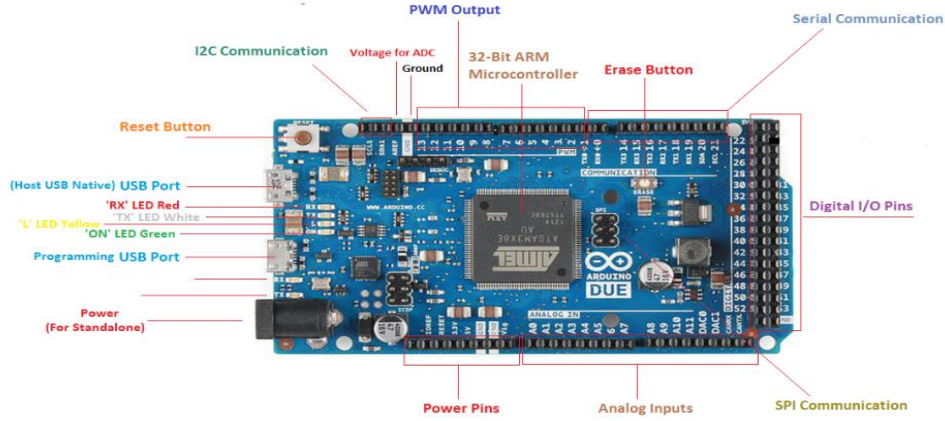
ظهر مصطلح الحواسيب المصغرة (Mini-Computer) في منتصف الستينات، وهي عبارة عن جهاز كمبيوتر أحادي اللوحة (single board computer) تمّ تجميع المكونات الأساسية على اللوحة الأم مثل الذاكرة العشوائية، معالج (معالجات دقيقة)، مداخل/مخارج، ...، ووضع المكونات الطرفية مثل المنافذ التسلسلية، والتفرعية، و USB ودعم لوحة المفاتيح والماوس. تتميز بأنها صغيرة الحجم، خفيفة الوزن، رخيصة الثمن وذات كفاءة عالية. هذه الميزات كانت السبب الأساسي في انتشارها بشكل واسع كاستخدامها لأهداف تعليمية أو كوحدات تحكم مدمجة، وتمّ العمل على تطويرها لتصبح ملائمة للتطور الصناعي.

يدعم برنامج ماتلاب العديد من المتحكمات واللوحات التطويرية التي تقوم بمعالجة البيانات القادمة من الحساسات أو تطوير ومحاكاة خوارزميات التحكم لتنفيذها بشكل مستقل عن الماتلاب. تمّ تصميم العديد من اللوحات التطويرية، استخدمنا في هذا العمل: بطاقة راسبري باي وبطاقة أردوينو.

### 1.11.2. بطاقة أردوينو Arduino

يوجد أنواع عديدة من هذه البطاقة، فهي واحدة من أكثر البطاقات التطويرية انتشاراً، ويُستخدم لبناء الكثير من الأفكار والمشاريع المتعلقة بالتحكم والأتمتة بصورة سهلة. نستخدم في هذا العمل بطاقة Arduino-Due، إنها مجهزة بمتحكم صغري ARM Cortex M3 32-bit وحيد النواة من شركة Atmel (ATSAM3X8E) مع تردد عمل 84MHZ (الشكل 2-17).

[39]

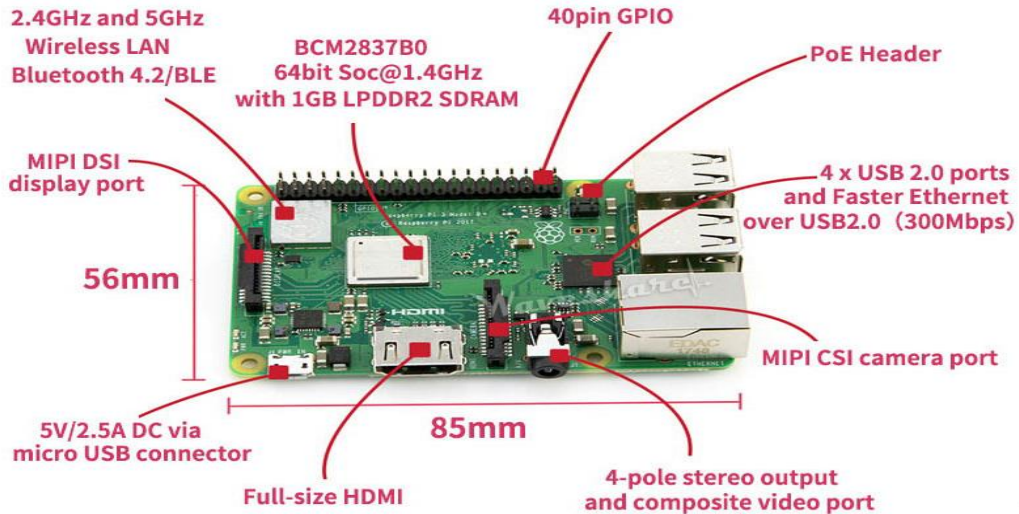


الشكل 2-17: بطاقة Arduino-Due

## 2.11.2. بطاقة راسبري باي "Raspberry-Pi"

تتوفر لوحة الراسبري باي بإصدارين هما module A و module B حيث يتمثل الاختلاف بين الإصدارين في مساحة الذاكرة العشوائية وعدد مداخل USB ومدخل شبكة Ethernet بطاقة الراسبري باي عبارة عن حاسب آلي متكامل مصنوع من شريحة الكترونية واحدة (SOC) System On Chip، تمّ تصميمه في جامعة كامبريدج للمساعدة في تدريس علوم الحاسب إذ أنه يدمج ما بين أنظمة لينكس (Linux) وعلم البرمجة والالكترونيات وأنظمة التحكم الذكية في الوقت ذاته.

في هذا البحث سيتم استخدام البطاقة Raspberry-Pi3 B+ إنها مجهزة بمعالج 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 مع تردد عمل 1.4GHZ (الشكل 2-18) [40].



الشكل 2-18: بطاقة Raspberry-Pi3 B+

## 12.2. الخلاصة

تمّ تقديم دراسة حول تطور خوارزميات وأساليب التحكم والترابط بينها وبين الأذرع الروبوتية، كما تمّ عرض دراسة عن خوارزميات التحكم التي سيتم استخدامها في هذا البحث للتحكم بموضع ذراع روبوت هجين ذات درجتي حرّية وتحديثنا عن المكونات الأساسية التي تتألف منها كل من الخوارزميات السابقة وكما عرفنا جميع الأدوات البرمجية التي استخدمت في هذا البحث.

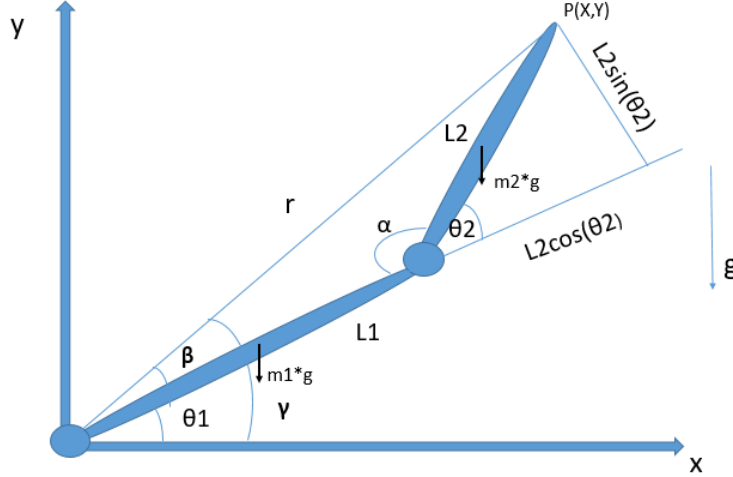
## الفصل الثالث

### 3. الدراسة النظرية

نقوم في هذا الفصل بتقديم دراسة نظرية تتضمن إيجاد النموذج الهندسي المباشر والعكسي والنموذج الديناميكي للذراع، بالإضافة إلى نمذجة محرك التيار المستمر المستخدم لكل رابطة دورانية في بيئة ماتلاب. وتمّ إيجاد معادلات الحالة للجملة المكوّنة من النموذج الديناميكي للذراع ومحركي تيار مستمر (محرك لكل مفصل).

### 1.3. الدراسة الحركية والتحريرية للذراع

يُمكن تمثيل ذراع روبوت ذات درجتين حريية محمولة على قاعدة متحركة ببساطة في المستوي وفق (الشكل 1-3).



الشكل 1-3: المخطط الحركي للذراع

#### 1.1.3. النموذج الهندسي المباشر

يتمثل النموذج الهندسي المباشر بالمعادلات التالية:

$$P_x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (3.1)$$

$$P_y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (3.2)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (3.3)$$

#### 2.1.3. النموذج الهندسي العكسي

نستخدم علاقة  $\cos$  في المثلث

$$r^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos (\alpha) \quad (3.4)$$

وبالتالي نجد

$$\cos(\alpha) = \frac{L_1^2 + L_2^2 - r^2}{2L_1L_2} \quad (3.5)$$

ولكن لدينا

$$\theta_2 = \pi - \alpha, \quad \cos(\theta_2) = -\cos(\alpha) = \frac{p_x^2 + p_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (3.6)$$

لإيجاد الزاوية  $\theta_1$  لدينا

$$\gamma = \text{atan} \left( \frac{p_x}{p_y} \right) ; \quad \theta_1 = \gamma - \beta \quad (3.7)$$

$$\theta_1 = \text{atan} \left( \frac{p_x}{p_y} \right) - \text{atan} \left( \frac{L_2 \sin(\theta_2)}{L_1 + L_2 \cos(\theta_2)} \right) \quad (3.8)$$

وبالتالي حصلنا على النموذج العكسي المتمثل بالمعادلتين التاليتين:

$$\theta_2 = \pm \text{acos} \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right) \quad (3.9)$$

$$\theta_1 = \text{atan} \left( \frac{p_x}{p_y} \right) \mp \text{atan} \left( \frac{L_2 \sin(\theta_2)}{L_1 + L_2 \cos(\theta_2)} \right) \quad (3.10)$$

### 2.3. النموذج الديناميكي لذراع الروبوت

لإيجاد النموذج الديناميكي لذراع الروبوت أولاً سيتم إيجاد الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لكل مفصل على حداً وبعد ذلك إيجاد الطاقة الحركية والكامنة الكلية للذراع، ومن ثم تطبيق علاقة أولر-لاغرانج (Euler-Lagrange)، لاستنتاج عزم كل مفصل وبعدها نوجد عزم الذراع بدرجتي حرية حيث أن كتلة المفصل الأول  $m_1$  وكتلة المفصل الثاني  $m_2$ ، وطول المفاصل  $L_1, L_2$ ، وأنصاف أطوال المفاصل  $l_{c1}, l_{c2}$ ، وعزم عطالة المفاصل  $I_1, I_2$  حول محاور تناظرها.

نبدأ باستنتاج الطاقة الحركية والطاقة الكامنة للمفصل الأول حسب العلاقة (3.11):

$$K = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2 ; \quad \omega_1 = \dot{\theta}_1 \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= l_{c1} \sin \theta_1 \Rightarrow \dot{x}_1 = l_{c1} \cos \theta_1 * \dot{\theta}_1 \\ y_1 &= l_{c1} \cos \theta_1 \Rightarrow \dot{y}_1 = -l_{c1} \sin \theta_1 * \dot{\theta}_1 \\ v_1^2 &= [l_{c1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \quad - l_{c1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1] \begin{bmatrix} l_{c1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ -l_{c1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} = l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned}$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 = \left( \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 + \frac{1}{2} I_1 \right) * \dot{\theta}_1^2 \quad (3.12)$$

$$P_1 = m_1 g h_1 = m_1 g * l_{c1} * \sin \theta_1 \quad (3.13)$$

حيث:

$K_1$ : تمثل الطاقة الحركية للمفصل الأول.

$P_1$ : تمثل الطاقة الكامنة للمفصل الأول.

ثم استنتاج الطاقة الحركية والكامنة للمفصل الثاني

$$x_2 = L_1 \sin \theta_1 + l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \Rightarrow \quad (3.14)$$

$$\dot{x}_2 = L_1 \cos \theta_1 * \dot{\theta}_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$y_2 = L_1 \cos \theta_1 + l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
\dot{y}_2 &= -L_1 \sin\theta_1 * \dot{\theta}_1 - l_{c2} * \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\
v_2^2 &= L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{c2}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 l_{c2} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \cos\theta_2 \\
K_2 &= \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2 ; \quad \omega_2 = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \\
K_2 &= \frac{1}{2} m_2 L_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 L_1 l_{c2} (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \cos\theta_2 \\
&\quad + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$P_2 = m_2 g h_2 = m_2 L_1 g \sin\theta_1 + m_2 l_{c2} g \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{3.16}$$

حيث:

$K_2$ : تمثل الطاقة الحركية للمفصل الثاني.

$P_2$ : تمثل الطاقة الكامنة للمفصل الثاني.

إيجاد الطاقة الحركية والكامنة للذراع:

$$\begin{aligned}
K(\theta, \dot{\theta}) &= \sum_i^n K_i(\theta, \dot{\theta}) \\
K(\theta, \dot{\theta}) &= \left( \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 + m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} I_1 + \frac{1}{2} I_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 + \frac{1}{2} I_2 \right) \dot{\theta}_2^2 \\
&\quad + (m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2
\end{aligned} \tag{3.17}$$

$$P(\theta) = \sum_i^n P_i(\theta) \tag{3.18}$$

$$P(\theta) = m_1 g * l_{c1} * \cos\theta_1 + m_2 L_1 g \sin\theta_1 + m_2 l_{c2} g \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

نقوم بعد ذلك بتطبيق علاقة أولر-لاغرانج:

$$\begin{aligned}
L &= K - P \\
L &= \left( \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 + \frac{1}{2} m_2 L_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 + m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + \frac{1}{2} I_1 \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{2} I_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 + \frac{1}{2} I_2 \right) \dot{\theta}_2^2 \\
&\quad + (m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - (m_1 g l_{c1} \\
&\quad * \sin\theta_1 + m_2 L_1 g \sin\theta_1 + m_2 l_{c2} g \sin(\theta_1 + \theta_2))
\end{aligned} \tag{3.19}$$

نقوم بإيجاد عزم المفصل الأول وفق العلاقة:

$$T_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{\theta}_1} \right) - \frac{dL}{d\theta_1}, \quad i = 1, 2 \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{\theta}_1} \right) = & (m_1 l_{c1}^2 + m_2 L_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + I_1 \\ & + I_2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \\ & - [2m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - [m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_2^2 \end{aligned}$$

$$\frac{dL}{d\theta_1} = m_1 g l_{c1} \cos\theta_1 + m_2 L_1 g \cos\theta_1 + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\begin{aligned} T_1 = & [m_1 l_{c1}^2 + m_2 L_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + I_1 + I_2] \ddot{\theta}_1 \\ & + [m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2] \ddot{\theta}_2 \\ & - [2m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - [m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_2^2 \\ & + m_1 g l_{c1} \cos\theta_1 + m_2 L_1 g \cos\theta_1 \\ & + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

إيجاد عزم المفصل الثاني  
(3.21)

$$T_2 = \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{\theta}_2} \right) - \frac{dL}{d\theta_2}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{\theta}_2} \right) = & [m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + I_2] \ddot{\theta}_2 \\ & - [m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dL}{d\theta_2} = & -[m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1^2 - [m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ & - m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_2 = & [m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2] \ddot{\theta}_1 + [m_2 l_{c2}^2 + I_2] \ddot{\theta}_2 \\ & + [m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2] \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

وبالتالي تُكتب علاقة عزوم المفاصل الأول والثاني على شكل مصفوفة:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & D_{13} \\ D_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{14} & D_{14} \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$+ \begin{bmatrix} D_{15} \\ D_{25} \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 L_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + I_1 + I_2$$

$$D_{12} = D_{21} = m_2 L_1 l_{c2} \cos\theta_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$D_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$D_{13} = -m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2$$

$$D_{23} = m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2$$

$$D_{14} = -2m_2 L_1 l_{c2} \sin\theta_2$$

$$D_{15} = m_1 g l_{c1} \cos\theta_1 + m_2 L_1 g \cos\theta_1 + m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$D_{25} = m_2 l_{c2} g \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

لحساب الشكل العام للنموذج الديناميكي العكسي للذراع وفق العلاقة:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \right)^{-1} \left( \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & D_{13} \\ D_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{14} & D_{14} \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_{15} \\ D_{25} \end{bmatrix} \right) \quad (3.23)$$

بتطبيق العلاقة السابقة نحصل على معادلتى التسارع لكلا المفصلين:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & ((m_2 l_{c2}^2 + L_1 m_2 \cos(\theta_2) l_{c2} + I_2) * (L_1 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\ & - T_2 + g l_{c2} m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))) / (I_1 I_2 \\ & + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 + I_2 l_{c1}^2 m_1 \\ & + I_1 l_{c2}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) + ((m_2 l_{c2}^2 + I_2) * (T_1 \\ & - g m_2 (l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos(\theta_1)) \\ & - g l_{c1} m_1 \cos(\theta_1) + L_1 \dot{\theta}_2 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) * (2\dot{\theta}_1 \\ & + \dot{\theta}_2))) / (I_1 I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 \\ & + I_2 l_{c1}^2 m_1 + I_1 l_{c2}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta}_2 = & - ((L_1 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 - T_2 + g l_{c2} m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \\
& * (m_2 L_1^2 + 2m_2 \cos(\theta_2) L_1 l_{c2} + m_1 l_{c1}^2 \\
& + m_2 l_{c2}^2 + I_1 + I_2)) / (I_1 I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \\
& + I_2 l_{c1}^2 m_2 + I_2 l_{c1}^2 m_1 + I_1 l_{c2}^2 m_2 \\
& + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) \\
& - ((m_2 l_{c2}^2 + L_1 m_2 \cos(\theta_2) l_{c2} + I_2) * (T_1 - g m_2 \\
& * (l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos(\theta_1)) - g l_{c1} m_1 \\
& * \cos(\theta_1) + L_1 \dot{\theta}_2 l_2 m_2 \sin(\theta_2) * (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2))) / (I_1 \\
& * I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 + I_2 l_{c1}^2 m_1 \\
& + I_1 l_{c1}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\
& - l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2)
\end{aligned} \quad (3.25)$$

### 3.3. نمذجة محرك تيار مستمر ذو مغناطيس ثابت DC

محركات التيار المستمر هي إحدى المحركات الرئيسية الأكثر استعمالاً في الصناعة. هذه المحركات لها أهمية بالغة في تطبيقات التحكم الآلي نظراً لسهولة التحكم في حركتها قيمةً واتجاهاً أي أنه يمكن التحكم في سرعتها بقيم تبدأ من الصفر وإلى أكبر قيمة في كلا الاتجاهين. تتوفر هذه المحركات في الصناعة بعدة أنواع وأحجام. يُعتبر محرك dc بشكل مبسّط على أنه مجموعة كبيرة من الأسلاك الملتفة بشكل حلقات يمر فيها تيار كهربائي، وهذه الحلقات توجد ضمن حقل مغناطيسي، يزداد عزم المحرك بشكل خطي مع التيار الكهربائي كما في العلاقة التالية:

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (3.26)$$

حيث:

- $K_t$ : ثابت العزم.
- $T_m$ : عزم المحرك.
- $I_a(t)$ : تيار المحرك.

كذلك القوة المحركة الكهربائية تزداد بشكل خطي مع ازدياد سرعة دوران محور

المحرك:

$$e_b(t) = K_b \omega_m \quad (3.27)$$

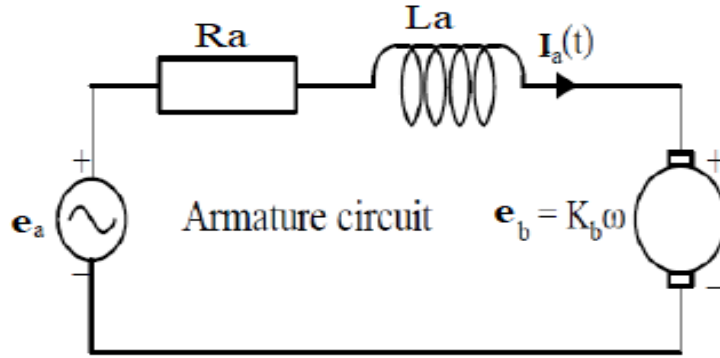
حيث:

- $K_b$ : ثابت القوة المحركة الكهربائية العكسية.

- $w_m = \dot{\theta}_m$ : السرعة الزاوية.
  - $e_b(t)$ : القوة المحركة الكهربائية العكسية.
- لدينا  $K_t = K_b = K$  عند استخدام الوحدات SI (volt-second per radian) [43].  
تُعطى العلاقة الميكانيكية للمحرك بالمعادلة التالية:

$$T_m(t) = J_T \frac{dw_m}{dt} + B_T w_m \quad (3.28)$$

- $B_T$ : الاحتكاك اللزج للمحرك والحمل.
  - $J_T$ : عزم العطالة للمحرك والحمل.
- يُمثل المحرك dc كهربائياً (الشكل 2-3):



الشكل 2-3: نمذجة المحرك كهربائياً

يُكتب جهد الدخل بالعلاقة التالية:

$$e_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (3.29)$$

بتطبيق تحويل لابلاس على علاقة جهد الدخل

$$E_a(S) = (R_a + L_a S) I_a(S) + K W_m(S) \quad (3.30)$$

بالتالي فإن تيار نموذج المحرك يعطى بالعلاقة التالية:

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a S} (E_a(S) - K W_m(S)) \quad (3.31)$$

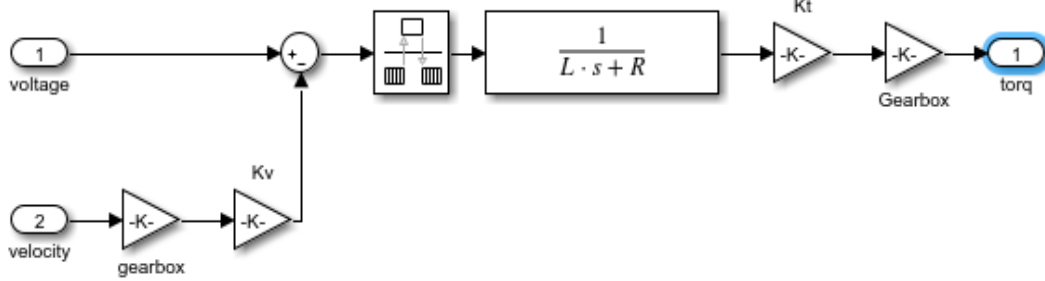
الشكل العام لتابع النقل لمحرك DC يعطى بالعلاقة [42]

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((L_a s + R_a)(J_T s + B_T) + K^2)} \quad (3.32)$$

حيث:  $R_a$ : مقاومة الدوّار،  $L_a$ : ذاتية الدوّار،  $I_a$ : تيار المحرك.

وبما أنّ التطبيق الحالي نستخدم فيه النمذجة التشاركية بين MATLAB والنموذج الميكانيكي للذراع ضمن بيئة Adams لا بدّ لنا من تعديل نموذج المحرك

(إهمال عزم عطالة المحرك)، يُبين (الشكل 3-3) نمذجة محرك DC في بيئة MATLAB/Simulink مع ربح علبة السرعة:



الشكل 3-3: نمذجة محرك DC

تُعطى علاقة العزم المقدّم من المحرك مع وجود علبة سرعة بالعلاقة التالية:

$$T_m(t) = \frac{KN_{gear}}{R_a + L_a s} (E_a(s) - KW_m(s)) \quad (3.33)$$

وبالتالي نحصل على علاقة تيار المحرك بتعويض (3.26) في العلاقة (3.33):

$$\begin{aligned} I_a(R_a + L_a s) &= V - N_{gear} K \dot{\theta}_m \Rightarrow \\ I_a R_a + L_a \dot{I} &= V - N_{gear} K \dot{\theta}_m \Rightarrow \\ \dot{I}_a &= \frac{1}{L_a} (V - KN_{gear} \dot{\theta}_m - R_a I_a) \end{aligned} \quad (3.34)$$

نسمي  $\dot{I}_{a1} = current_1, \dot{I}_{a2} = current_2$

#### 4.3. تمثيل نموذج الذراع والمحرك في فضاء الحالة

تُكتب معادلات الحالة بالعلاقات التالية:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.35)$$

$$\theta(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.36)$$

حيث:

$n = 6$ : بعد شعاع الحالة،  $m = 2$ : بعد شعاع الدخل،  $p = 2$ : بعد شعاع الخرج.

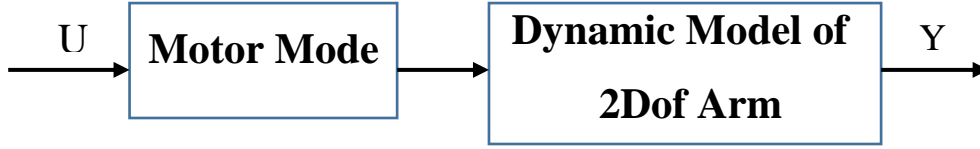
A: مصفوفة الحالة أبعادها  $(n * n)$ .

B: مصفوفة التحكم (مصفوفة الدخل) أبعادها  $(n * m)$ .

C: مصفوفة الرصد أبعادها  $(p * n)$ .

D: مصفوفة تعبر عن العلاقة بين الدخل والخرج وأبعادها  $(p * m)$ .

يتألف النظام الكلي من جملتين مرتبطتين على التسلسل كما في (الشكل 4-3).



الشكل 3-4: ربط نظامين على التسلسل

بدمج النموذج العكسي للذراع ونموذج المحرك نحصل على أربع معادلات تُمثّل جملة النظام بفضاء الحالة متمثلةً بشعاع دخل (الجهود المطبقة) وشعاع الخرج (زوايا المفاصل) وهو نظام لاخطي.

$$\ddot{\theta}_1 = ((m_2 l_{c2}^2 + L_1 m_2 \cos(\theta_2) l_{c2} + I_2) * (L_1 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} & - K_t * N_{gear} * current_2 + g l_{c2} m_2 \cos(\theta_1 \\ & + \theta_2)) / (I_1 I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 \\ & + I_2 l_{c1}^2 m_1 + I_1 l_{c2}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) + ((m_2 l_{c2}^2 + I_2) * (K_t \\ & * N_{gear} * current_1 - g m_2 (l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ & + L_1 \cos(\theta_1)) - g l_{c1} m_1 \cos(\theta_1) \\ & + L_1 \dot{\theta}_2 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) * (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2))) / (I_1 I_2 \\ & + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 + I_2 l_{c1}^2 m_1 \\ & + I_1 l_{c2}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) \end{aligned}$$

$$\ddot{\theta}_2 = - ((L_1 l_{c2} m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 - K_t * N_{gear} * current_2 \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} & + g l_{c2} m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) * (m_2 L_1^2 \\ & + 2m_2 \cos(\theta_2) L_1 l_{c2} + m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_{c2}^2 + I_1 \\ & + I_2)) / (I_1 I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 l_{c1}^2 m_2 \\ & + I_2 l_{c1}^2 m_1 + I_1 l_{c2}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) - ((m_2 l_{c2}^2 \\ & + L_1 m_2 \cos(\theta_2) l_{c2} + I_2) * (K_t * N_{gear} * current_1 \\ & - g m_2 * (l_{c2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos(\theta_1)) \\ & - g l_{c1} m_1 * \cos(\theta_1) + L_1 \dot{\theta}_2 l_2 m_2 \sin(\theta_2) * (2\dot{\theta}_1 \\ & + \dot{\theta}_2))) / (I_1 * I_2 + L_1^2 l_{c2}^2 m_2^2 + I_2 L_1^2 m_2 \\ & + I_2 l_{c1}^2 m_1 + I_1 l_{c1}^2 m_2 + l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_1 m_2 \\ & - l_{c1}^2 l_{c2}^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2) \end{aligned}$$

$$current_1 = \frac{1}{L_{a1}} (V1 - K_1 * N_{gear} * \dot{\theta}_1 - R_{a1} * I_{a1}) \quad (3.39)$$

$$current_2 = \frac{1}{L_{a2}} (V2 - K_2 * N_{gear} * \dot{\theta}_2 - R_{a2} * I_{a2}) \quad (3.40)$$

لإيجاد شعاع الحالة نفرض أن:

$$x_1 = \theta_1, x_2 = \theta_2, x_3 = \dot{\theta}_1, x_4 = \dot{\theta}_2, x_5 = current_2, x_6 = current_1$$

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta}_1 = x_3, \dot{x}_2 = \dot{\theta}_2 = x_4, \dot{x}_3 = \ddot{\theta}_1, \dot{x}_4 = \ddot{\theta}_2, \dot{x}_5 = current_1, \dot{x}_6 = current_2$$

$$x = \text{شعاع الخرج}, y = [\theta_1, \theta_2], u = [V_1, V_2] \text{ شعاع الدخل}$$

$$[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \text{ شعاع الحالة.}$$

حيث:

- $u$ : جهد المحرك الأول، جهد المحرك الثاني.
  - $y$ : زاوية المفصل الأول، زاوية المفصل الثاني.
  - $N_{gear}$ : ربح علبة السرعة.
  - $x$ : شعاع الحالة.
- بالتعويض في الشكل العام لمعادلات الحالة فنحصل على:

حيث:

- $f(x, u)$ : تابع غير خطي يربط تطور شعاع الحالة بشعاع الحالة و شعاع الدخل.
- $h(x, u)$ : تابع غير خطي يربط شعاع الخرج بشعاع الحالة و شعاع الدخل.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = A(6x6) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + B(6x2) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = f(x, u) \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = C(2 \times 6) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + D(2 \times 2) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = h(x, u) \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = C(2 \times 6) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + D(2 \times 2) \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = h(x, u) \quad (3.43)$$

لتبسيط المعادلات التفاضلية اللاخطية يتم اتباع الطريقة الخطية (Linearization) حول نقاط تشغيل معينة  $x_{oper\_point} = x_o$  تنتمي لمجال عمل النظام.

$$x(t) = x_o(t) + \Delta x(t) \quad (3.44)$$

$$u(t) = u_o(t) + \Delta u(t) \quad (3.45)$$

$$y(t) = h(x_o(t), u_o(t)) + \Delta y(t) \quad (3.46)$$

وبالتالي تصبح معادلات الجملة باستخدام منشور تايلور تتمثل بالمعادلات التالية

$$\dot{x} = f(x_o, u_o) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_o, u_o} \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x_o, u_o} \Delta u \quad (3.47)$$

$$y = h(x_o, u_o) + \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_o, u_o} \Delta x + \left. \frac{\partial h}{\partial u} \right|_{x_o, u_o} \Delta u \quad (3.48)$$

وبالتالي نحصل على مصفوفات الجملة عند نقطة التشغيل المحددة بإجراء المشتقات الآتية:

$$A_{i,j} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{x_o, u_o}, B_{i,j} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right|_{x_o, u_o}, C_{i,j} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right|_{x_o, u_o}, \quad (3.49)$$

$$D_{i,j} = \left. \frac{\partial h_i}{\partial u_j} \right|_{x_o, u_o}$$

عندها يمكننا إيجاد النموذج الخطي للجملة (مصفوفات الحالة) عند أي نقطة عمل من مجال حركة النظام.

### 1.4.3. إيجاد النموذج الديناميكي عند نقطة عمل محددة

تمَّ إيجاد النموذج الديناميكي الخطي للجملة لكي نأخذ فكرة عن شكلها عند نقطة عمل محددة ولكي نستفاد منها في تحديد نمط الجملة لمعرفة سبب عدم انعدام الخطأ السكوني عند تطبيق إشارة Ramp لاحقاً.  
من أجل إيجاد النموذج الخطي يجب تحديد نقطة عمل يتم حساب مصفوفات فضاء الحالة بجوارها

$$x = x_0 = \left[ \frac{\pi}{3}, \frac{-3 * \pi}{4}, 0, 0, 0, 0 \right], \quad u = u_0$$

باستخدام العلاقات الموصوفة في الفقرة السابقة، تمَّ إيجاد مصفوفات فضاء الحالة الخطية A, B, C, D فصلنا على:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 11.9794 & 1.889 & -0.0286 & 0.04204 & 1192.03 & -1751.634 \\ -36.033 & -20.289 & 0.0420 & -0.203 & -1751.634 & 8468.4 \\ 0 & 0 & -3.75 & 0 & -155.556 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.75 & 0 & -155.56 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = [0]$$

بما أنَّ الجملة ثنائية الدخل وثنائية الخرج، فإنَّ تابع التحويل يتمثل بمصفوفة ثنائية البعد 2×2 وفق العلاقة:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

حيثُ:

$G_{11}(s)$ : تابع التحويل يربط بين موضع المفصل الأول  $\theta_1$  وجهد المحرك الأول .voltage1

$G_{12}(s)$ : تابع التحويل يربط بين موضع المفصل الأول  $\theta_1$  وجهد المحرك الثاني .voltage2

$G_{21}(s)$ : تابع التحويل يربط بين موضع المفصل الثاني  $\theta_2$  وجهد المحرك الأول .voltage1

$G_{22}(s)$ : تابع التحويل يربط بين موضع المفصل الثاني  $\theta_2$  وجهد المحرك الثاني .voltage2

تُعطى توابع التحويل وفق العلاقات التالية بعد حذف قيم الأقطاب والأصفار المتقاربة.

$$G_{11}(s) = \frac{(s + 154.78)(s + 0.44 \pm 4.27j)}{(s + 77.78 \pm 158.44j)(s + 77.97 \pm 38.10j)(s - 0.27)(s + 0.17)}$$

$$G_{12}(s) = \frac{(s + 155.56)(s \pm 4.9508)}{(s + 77.78 \pm 158.44j)(s + 77.97 \pm 38.10j)(s - 0.27)(s + 0.17)}$$

$$G_{21}(s) = \frac{(s + 155.56)(s \pm 4.9364)}{(s + 77.78 \pm 158.44j)(s + 77.97 \pm 38.10j)(s - 0.27)(s + 0.17)}$$

$$G_{22}(s) = \frac{1}{(s + 77.78 \pm 158.44j)(s + 0.17)}$$

تمّ حساب أقطاب وأصفار الجملة بجوار نقطة العمل  
✓ أقطاب النظام:

$$-77.78 \pm 158.44j, -77 \pm 38.10j, 0.27, -0.17$$

✓ أصفار تابع التحويل  $G_{11}(s)$ :

$$-154.78, -0.44 \pm 4.27j$$

✓ أصفار تابع التحويل  $G_{12}(s)$ :

$$-155.56, \pm 4.9508$$

✓ أصفار تابع التحويل  $G_{21}(s)$ :

$$-155.56, \pm 4.9364$$

✓ أصفار تابع التحويل  $G_{22}(s)$ :

$$-77.93 \pm 47.57j, 0.23$$

نُلاحظ أنّ تابع التحويل  $G_{22}(s)$  الذي يربط موضع المفصل الثاني بجهد المحرك المطبق يأخذ شكل بسيط مقارنةً بتوابع التحويل  $G_{11}(s)$ ,  $G_{12}(s)$ ,  $G_{21}(s)$  وهذا منطقي لأنّه لا يتعلق أبداً بالمفصل الأول ولا بجهد المحرك الأول.

### 5.3. الخلاصة

عرضنا في هذا الفصل دراسة حركية وتحريكية لذراع بدرجتى حرّية، وتمّ إيجاد المعادلات الديناميكية للذراع بالاعتماد على معادلات أولر-لاغرانج، وكما تمّ نمذجة محرك التيار المستمر المستخدم في بيئة ماتلاب، وبعد ذلك قمنا بالدمج بين نموذج المحرك والمعادلات الديناميكية السابقة من أجل إيجاد المعادلات بفضاء الحالة لجملة (ذراع + محركين DC).

## الفصل الرابع

---

### 4. النمذجة التشاركية والمحاكاة

---

تمّ في هذا الفصل توضيح مبدأ النمذجة التشاركية، وتصميم وتنفيذ خوارزميات التحكم على الذراع الروبوتية وكما تمّ تنفيذ المحاكاة PIL على بطاقة Raspberry-Pi.

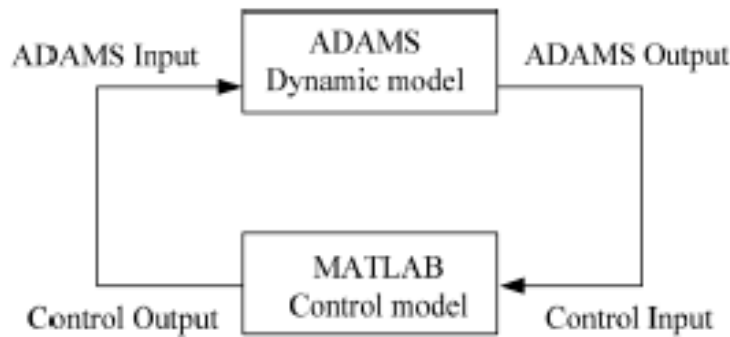
## 1.4. مقدمة

التطور السريع في تقنيات المحاكاة وتطبيقاتها زاد من حجم وتعقيد الهدف من الأبحاث العلمية، وأصبح من الصعوبة تلبية تلك المتطلبات المرجوة من الأبحاث في حال الاعتماد على بيئة برمجية واحدة مثل بيئة التحكم أو الميكانيك أو الهيدروليك أو غيرها من البرمجيات. وبالتالي الأمر الذي يتطلب استخدام النمذجة التشاركية عند تصميم منظومة إلكتروميكانيكية معقدة وذلك لأنها تسمح بالاتصال بين مختلف البرمجيات، لذلك فإن النتائج المحسوبة في بيئة برمجية ما يمكن أن تُعتبر إشارات دخل إلى بيئة برمجية أخرى، هذه الإشارات تتضمن قوى أو عزوم أو إشارات أخرى ذات معنى فعندها يستجيب النموذج الموجود في البيئة الأخرى وفقاً لهذه الإشارات متمثلة بموضع أو سرعة أو تسارع. في هذا البحث تمّ الاستناد على برنامجي ADAMS® و MATLAB/SIMULINK® كإحدى تقنيات النمذجة التشاركية في مجال محاكاة النظم الإلكترونيةميكانيكية.

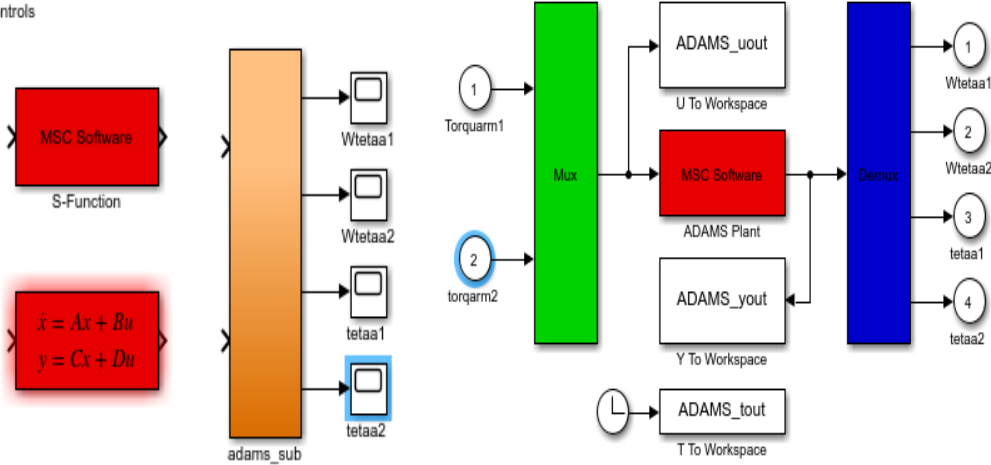
## 2.4. تنفيذ النمذجة التشاركية Co-simulation

تتم النمذجة التشاركية وفق الخطوات التالية:

- ❖ بناء نموذج ميكانيكي: في حال كان النموذج معقد يمكن تصميمه على برامج أخرى مثل CAD من ثمّ إدخاله إلى برنامج ADAMS، حيث يتم تحديد الروابط والقيود والقوى و...، وبعدها اختبار هذا النموذج للتأكد من أنّه صحيح قبل إضافة نظام التحكم.
- ❖ بناء الحلقة المغلقة: يتم تشكيل حلقة مغلقة بين ADAMS و Simulink، حيث يتم تعريف مخرجات النموذج (المتغيرات المراد التحكم بها) الذي تمّ تصميمه في ADAMS هي عبارة عن متغيرات دخل لبرنامج MATLAB/Simulink ولإغلاق الحلقة تكون متغيرات الخرج من Simulink هي متحولات دخل ADAMS، (الشكل 1-4) ويجب أن تكون المعاملات المعرّفة في MATLAB/Simulink متوافقة مع المعاملات في ADAMS [44][44].



الشكل 1-4: الحلقة المغلقة بين ADAMS و MATLAB/Simulink



(أ). دخل/ خرج المنظومة (ب) واجهة التخاطب

الشكل 4-2: المنظومة المصدرة إلى MATLAB/Simulink

عند تصدير النموذج الافتراضي للمنظومة المصممة من بيئة ADAMS إلى بيئة Simulink نحصل على (Adams-sub) واجهة التخاطب للنمذجة التشاركية التي تضم الوصل بين هذين البرنامجين (الشكل 4-2 (ب))، وعند فتح واجهة التخاطب نحصل موديل النموذج ويظهر فيه دخل/ خرج المنظومة (الشكل 4-2 (أ)).

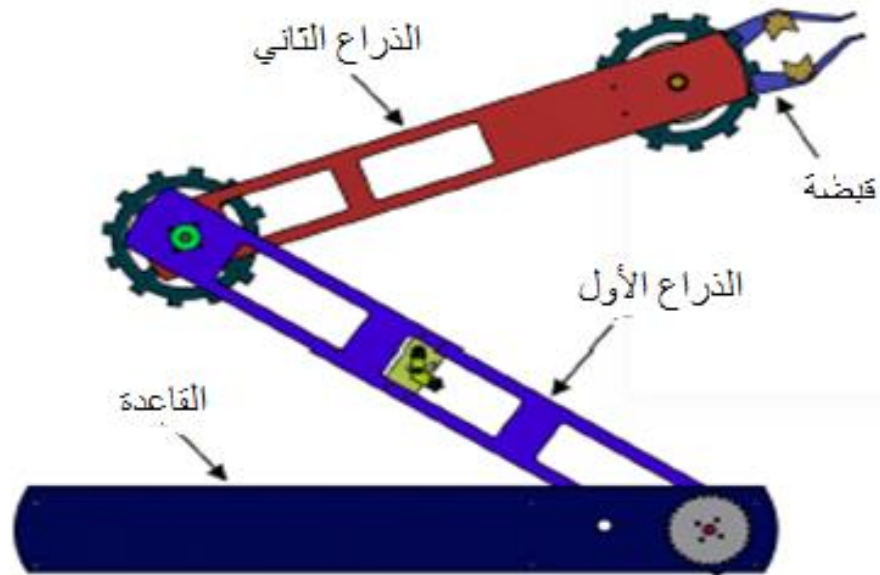
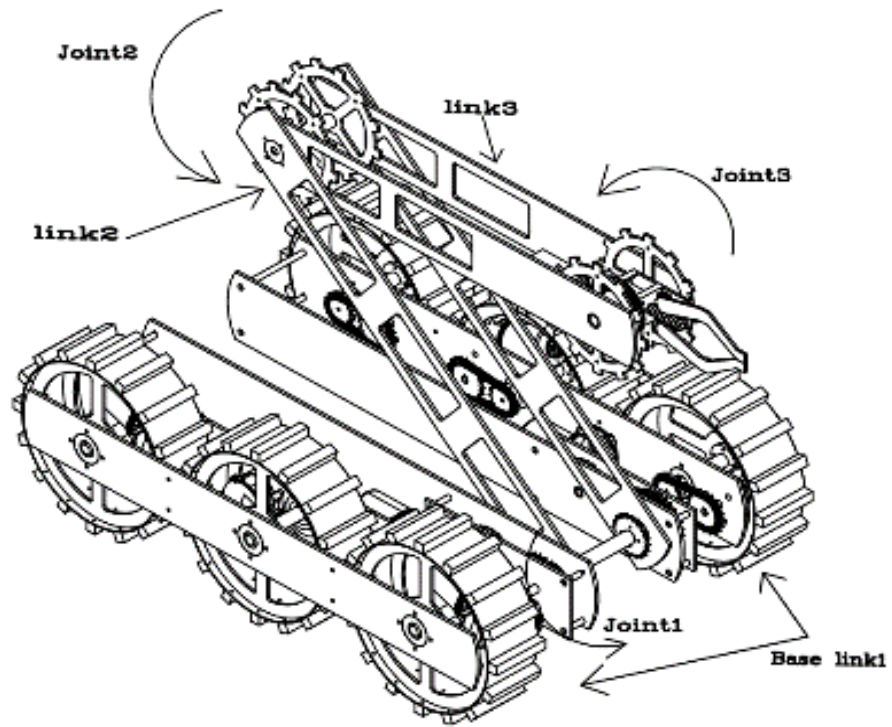
### 3.4. النموذج الافتراضي لذراع الروبوت الهجين

تمّ تصميم روبوت متحرك هجين في بيئة CAD ثم نُقل إلى بيئة ADAMS [41]. يُوضح (الشكل 4-3) مكونات الروبوت وهو عبارة عن مزيج من الروابط التسلسلية والتفرعية، حيث يتكوّن من منصة متحركة من أجل التنقل وذراع قادرة على المناورة مع إمكانية تبادل المهام فيما بينها.

يتألف الذراع من جزأين مرتبطين برابطة دورانية (مفصل أول)، كما يرتبط الجزء الأول مع القاعدة برابطة دورانية أيضاً (مفصل ثاني). كل مفصل مزوّد بمحرك تيار مستمر ذو مغناطيس ثابت استطاعته 120W.

تتم حركة الذراع في مستوي الشاقول، الأمر الذي يجعل العزم المقدم من قبل المحرك يختلف باختلاف زاوية الذراع، وذلك بسبب تأثير الجاذبية الأرضية. أثناء عملية الرفع يلعب ثقل الذراع دوراً سلبياً فيقوم المحرك بتوليد إضافي للتغلب على عزم ثقل الذراع، ويتناقص العزم المطلوب من المحرك مع زيادة زاوية الموضع حتى الوصول إلى الزاوية 90°. أمّا أثناء عملية التنزيل (التحريك) من الزاوية 90° إلى 180°، يقدّم المحرك عزم كبح ليمنع الذراع من السقوط بسرعة تحت تأثير ثقلها. وعند التحريك بالاتجاه المعاكس تتم نفس العملية السابقة.

مجال حركة المفصل الأول [0°, 180°] ، ومجال حركة المفصل الثاني هي [0°, 360°].



الشكل 3-4: مكونات الروبوت الهجين

يتضمن (جدول 1-4) الخصائص الميكانيكية للذراع.

جدول 1-4: الخصائص الميكانيكية للذراع

عزم العطالة (kg.m <sup>2</sup> )	سماكة الذراع (m)	عرض الذراع (m)	طول الذراع (m)	وزن الذراع (Kg)	الرابطة
0.353	0.15	0.13	0.682	2.28	1
0.109	0.11	0.13	0.572	1	2

#### 4.4. تصميم المتحكم Multiple Model-PID

تُعد تقنية الأرباح المجدولة التي ذكرناها سابقاً طريقة فعّالة وشائعة لتحسين أداء المتحكم PID عند التعامل مع الأنظمة اللاخطية وتمّ تطبيقها على نطاق واسع وقد حققت نجاحاً في العديد من المجالات وأهمها التحكم بمواضع الأذرع الروبوتية. إنّ إجرائية تصميم هذا المتحكم تتمثل في إيجاد المعاملات المناسبة (التناسبي، التفاضلي والتكاملي) لكل نموذج خطي يصف تصرف النظام حول مجال تشغيل محدد وبالتالي تتيح لنا التغلب على مشكلة اللاخطية التي يتصف بها هذا النظام.

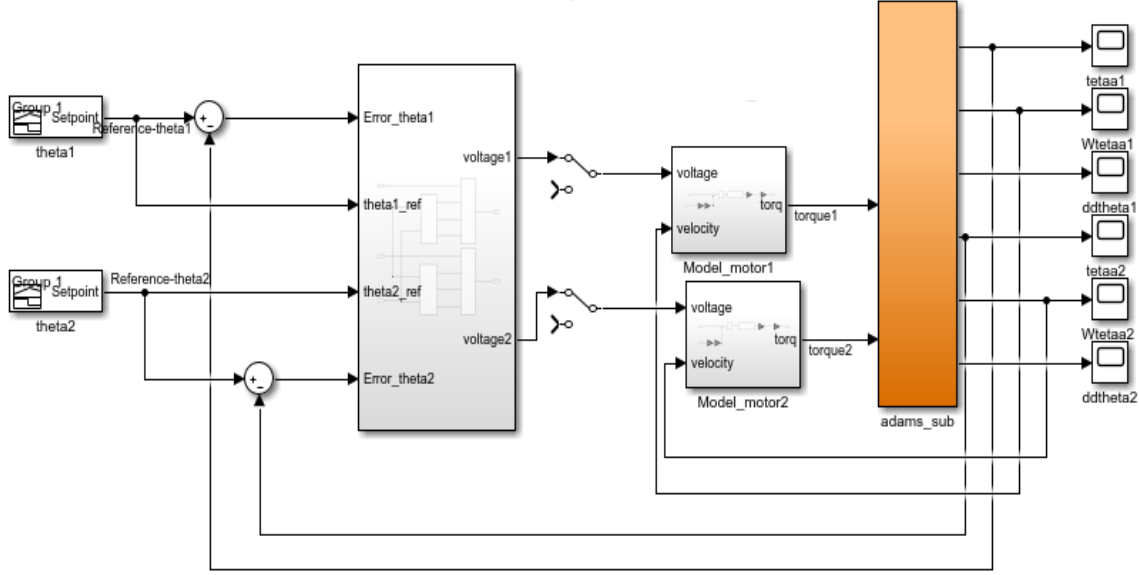
إنّ هذا المتحكم من النوع (SISO) Single Input Single Output لذا يجب تصميم متحكم Multi-PID لكل رابطة (C-joint1, C-joint2)، حيث تمّ ضبط قيم معاملات المتحكم وفقاً لاستجابة النظام في المجال الزمني بالاعتماد على طريقة Z-N المتمثلة بقيم المعاملات وفق (جدول 2-4) [28]، حيث يتم حساب المعاملات من أجل جميع مجالات التشغيل المعتبرة والتي يجب أن تغطي كامل مجال عمل النظام، وتصميم متحكم مناسب لكل منها عندها تُنظّم قيم هذه المعاملات ضمن جدول Lookup-table ضمن بيئة Matlab/Simulink.

جدول 2-4: طريقة زيغلر- نيكولس

Ziegler–Nichols method giving $K'$ values (loop times considered to be constant and equal to dT)			
Control Type	$K_p$	$K_i'$	$K_d'$
P	$0.50K_c$	0	0
PI	$0.45K_c$	$1.2K_p dT / P_c$	0
PID	$0.60K_c$	$2K_p dT / P_c$	$K_p P_c / (8dT)$

في هذا العمل تمّ تحديد مجال عمل المفصل الأول ضمن المجال  $[0^\circ, 180^\circ]$  والتي يتم جدولتها كل 15 درجة فنحصل على 13 نقطة، وبالنسبة للمفصل الثاني الذي يتحرك بمجال عمل

[0°, 360°] بالنسبة للمستوي الأفقي، أيضاً تمّ جدولته كل 30 درجة وبذلك حصلنا على 13 نقطة. وبالتالي بلغ إجمالي نقاط التشغيل حوالي 169 نموذجاً خطياً يغطي مساحة عمل كبيرة. يفترض أن يكون المسار بين كل نقطتين مجدولتين متتاليتين خطياً. يبيّن (الشكل 4-4) حلقة التحكم المغلقة لكلا المفصلين باستخدام هذه الخوارزمية.



الشكل 4-4: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Multi-PID

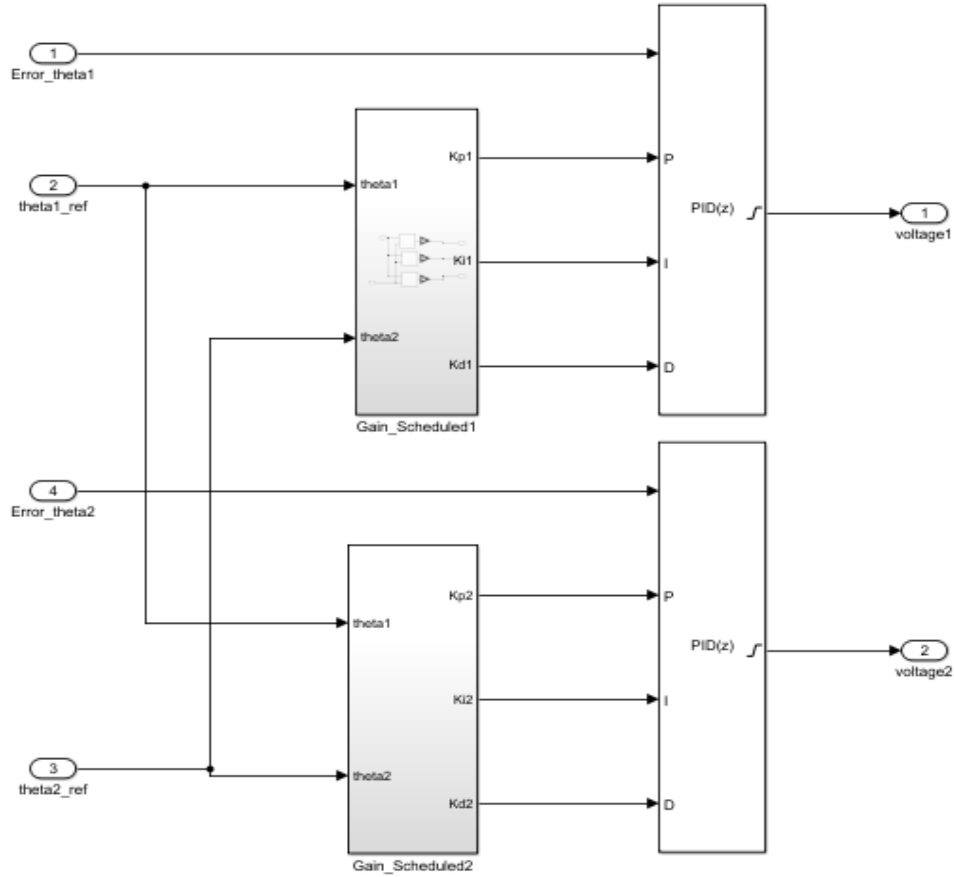
تتضمن حلقة التحكم السابقة إشارات مرجعية لكل مفصل:

- Reference\_theta1: إشارات مرجعية للمفصل الأول.

- Reference\_theta2: إشارات مرجعية للمفصل الثاني.

يحتوي الدخل المرجعي المستخدم على عدد من الانتقالات الخطوية للزوايا المطلوبة ضمن مجال عمل الذراع وذلك من أجل اختبار حلقة التحكم عند تطبيق الأوامر الصادرة عن استخدام الخوارزمية المصممة.

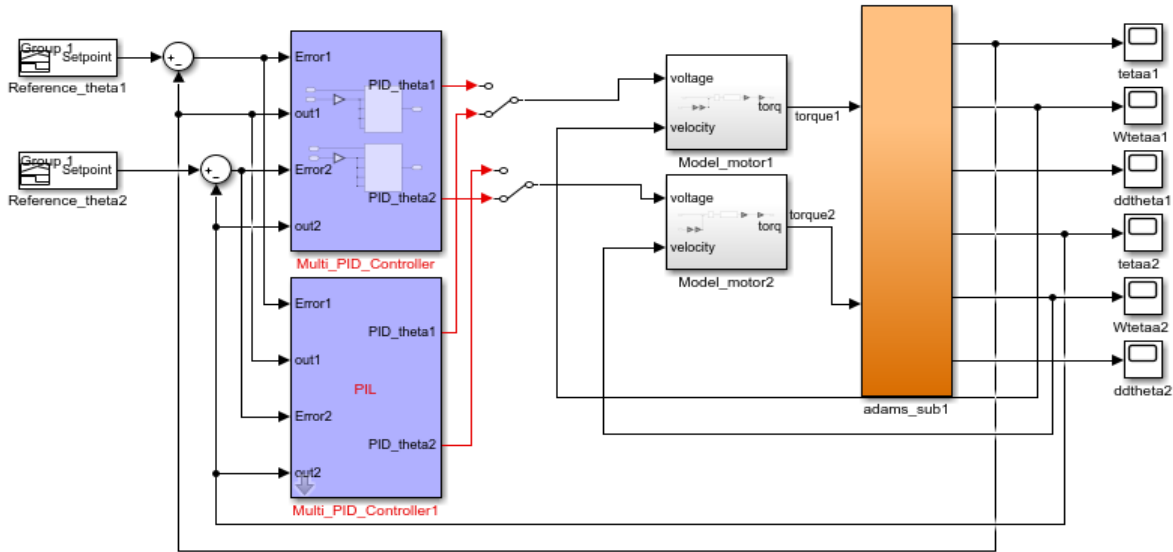
متحكم خاص بكل مفصل (الشكل 4-5) حيث تمّ دمجها ضمن برنامج جزئي يُمثّل وحدة التحكم لكلا المفصلين Multi\_PID\_Controller، نموذج لمحرك تيار مستمر DC لكل مفصل لتوليد عزم مناسب لرفع الذراع إلى الموضع المطلوب والنموذج الافتراضي للذراع المذكور سابقاً adams\_sub.



الشكل 4-5: مكونات وحدة التحكم Multi\_PID\_Controller

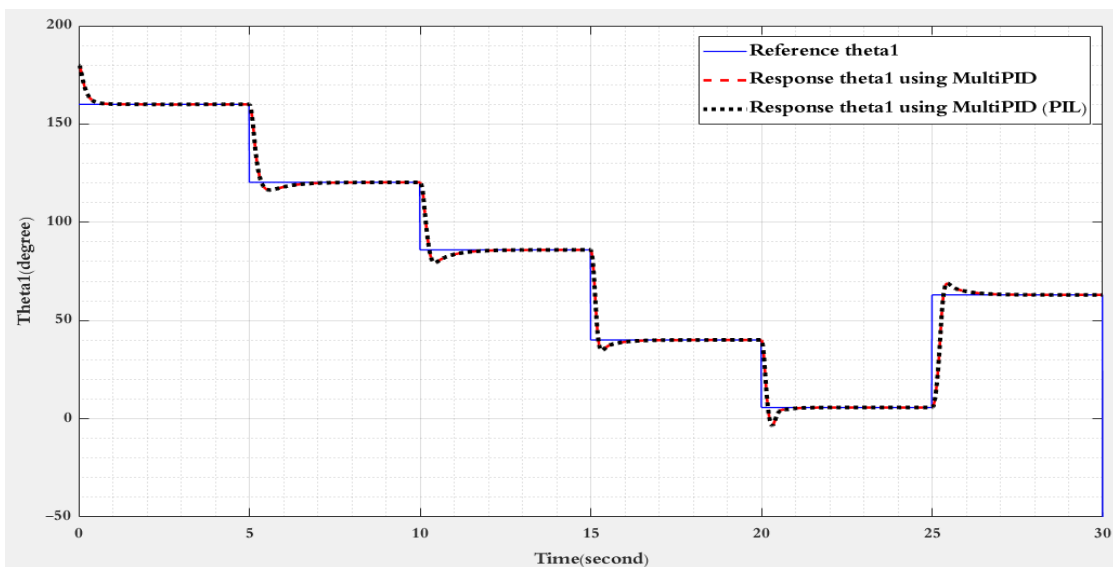
من أجل اختبار صحة تنفيذ أي خوارزمية تحكم - مصممة في بيئة الماتلاب- على الحواسيب المصغرة، لابدّ لنا من تحميل حزمة دعم المحاكاة الخاصة بهذه الحواسيب (Simulink Support packages hardware) في برنامج ماتلاب ليتمكن من التعرف عليها. تمّ استخدام بطاقتي الراسبري باي وأردوينو في هذا العمل وتحميل حزمة الدعم الخاصة بها، عندها يمكننا استخدام المحاكاة PIL التي توفرها بيئة Simulink حيث قمنا بربط كل من Raspberry-Pi و Arduino مع البرنامج عن طريق كبل الشبكة Ethernet ودمج كل منهما في المحاكاة من خلال اختيارها من قائمة (Model Configuration Parameters / Hardware board) كما يجب تحديد اسم البطاقة وعنوانها وتحديد الخيار Create PIL block من نفس القائمة السابقة باختيار (Code Generate / Advance parameters) وبعدها نقوم بتحميل الخوارزمية المصممة على البطاقة والتي يتم ترجمتها بشكل آلي وتتولد الخوارزمية في كتلة تُدعى PIL block التي يتم تنفيذها على البطاقة (الشكل 4-6).

يعد تشغيل خوارزمية التحكم مباشرةً على الحواسيب المصغرة جزءاً حاسماً من دورة التصميم لأنها تمكننا كما ذكرنا سابقاً من اختبار النماذج المختلفة لخوارزميات التحكم للكشف عن مشاكل التنفيذ في البيئة المدمجة وتقييم قدرة المعالج على تنفيذ خوارزميات التحكم من خلال مقارنة أداء هذه الخوارزميات على البطاقة مع أدائها في بيئة Simulink. لقد تمّ إضافة manual switch للموديل من أجل إمكانية تنفيذ كلا المحاكاتين (في بيئة Simulink وعلى بطاقة الراسبري باي/ آردوينو) بسهولة لمقارنة بينهما.

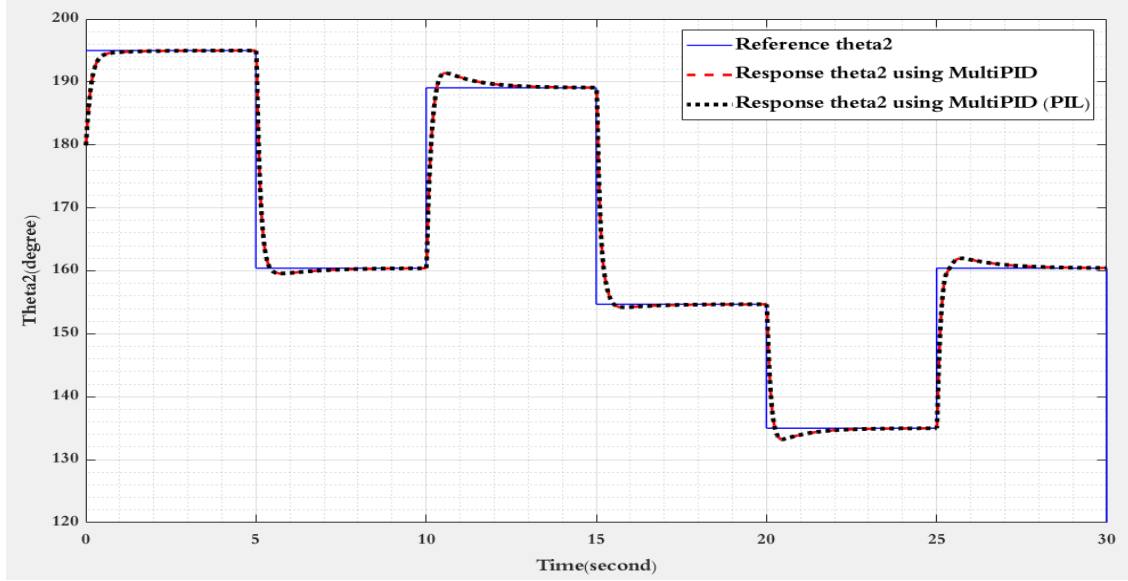


الشكل 4-6: حلقة التحكم المغلقة لكلا المفصلين باستخدام Multi-PID وإضافة المحاكاة PIL

يُبيّن (الشكل 4-7) استجابة المفصلين لأوامر التحكم الصادرة عن وحدة التحكم Multi-PID والاستجابة عند تطبيق المحاكاة PIL.



(a) المفصل الأول



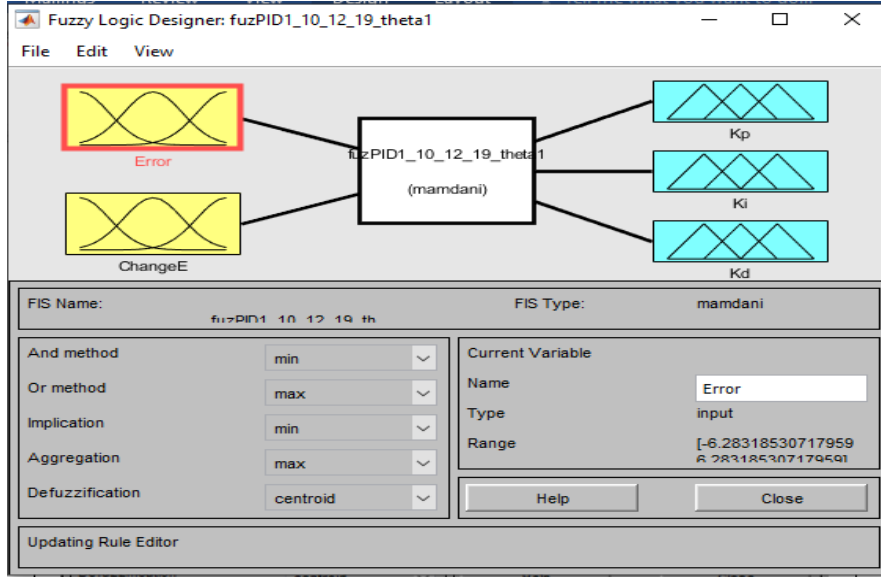
(b) المفصل الثاني

الشكل 4-7: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Multi-PID بالمقارنة بين استجابة النموذج للأوامر المرسلّة الصادرة عن البطاقتين R-Pi/ A-Due، تبين لنا أنّ أداء الخوارزمية Multi-PID على هاتين البطاقتين يتطابق مع أدائها في بيئة Simulink دون فروقات تذكر، مما يعني أنّها قادرة على تنفيذ هذه الخوارزمية بشكل جيد عند استخدام زمن التقطيع (0.01) نفسه.

#### 5.4. تصميم المتحكم Fuzzy-PID

يستند تصميم هذا المتحكم على مجموعة من الخطوات المبينة كالتالي:

1. تحديد متغيرات التحكم في المدخلات / المخرجات ومجالات تعريفها وتسميتها.
  2. إنشاء توابع الانتماء الترجيحية لمتغيرات الدخل المتمثلة بالخطأ ومعدّل تغيره  $(\Delta E, E)$  وثلاث متغيرات الخرج المتمثلة بمعاملات المتحكم PID  $(Kp, Ki, Kd)$ .
  3. بناء قاعدة الأوامر لجدولة الربح التكميلي لضبط معاملات وحدة التحكم  $Kp$  و  $Ki$  و  $Kd$  وفقاً لاختلاف ظروف التشغيل باستخدام نموذج الاستدلال Mamdani.
  4. تحديد كيف سيتم تنفيذ الإجراءات عن طريق تعيين نقاط القوة لهذه القواعد.
  5. جمع القواعد ثمّ تحديد طريقة فك التعويم كمرکز الجاذبية Center Of Gravity.
- يجب إتباع خطوات التصميم السابقة بالتسلسل من خلال إنشاء نظام الاستدلال الترجيحي (FIS)، يوضّح (الشكل 4-8) بنية نظام المنطق الترجيحي.



الشكل 4-8: بنية نظام المنطق الترجيحي

تم إضافة متغيرين على الدخل وثلاث متغيرات على الخرج موضحة وفق ما يلي:  
 دخل 1: الخطأ (error E).

دخل 2: تغير الخطأ ( $\Delta E$  change in error).

خرج 1: المعامل التناسبي ( $K_p$ ).

خرج 2: المعامل التكاملي ( $K_i$ ).

خرج 3: المعامل التفاضلي ( $K_d$ ).

فُمنّا بتمثيل متغيرات الدخل في وحدة التحكم المقترحة كمجموعة من سبعة متغيرات لغوية

لتوابع انتماء مثلثية وهي:

Negative Large (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (NS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL)

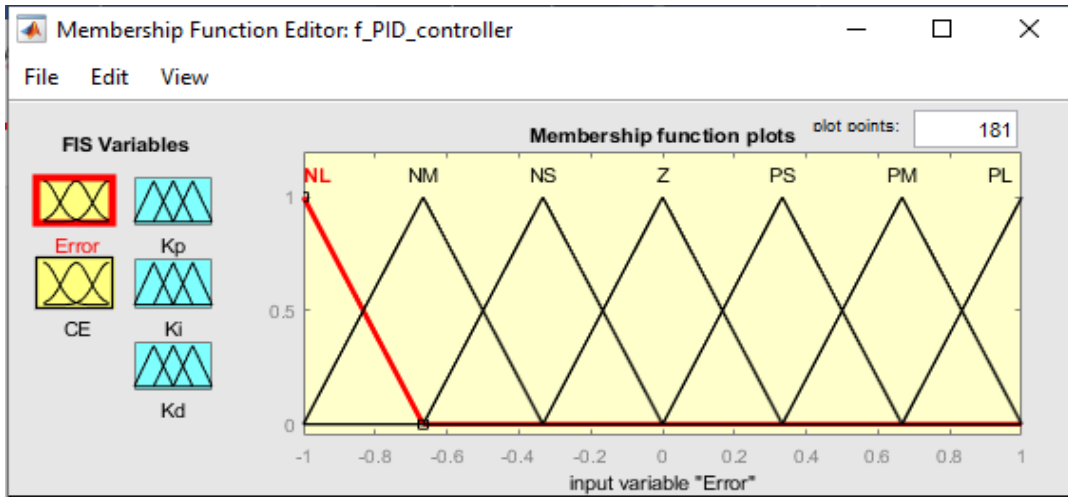
وبالنسبة لمتغيرات الخرج أيضاً تُمثّل كمجموعة من سبعة متغيرات لغوية لتوابع انتماء

مثلثية وهي:

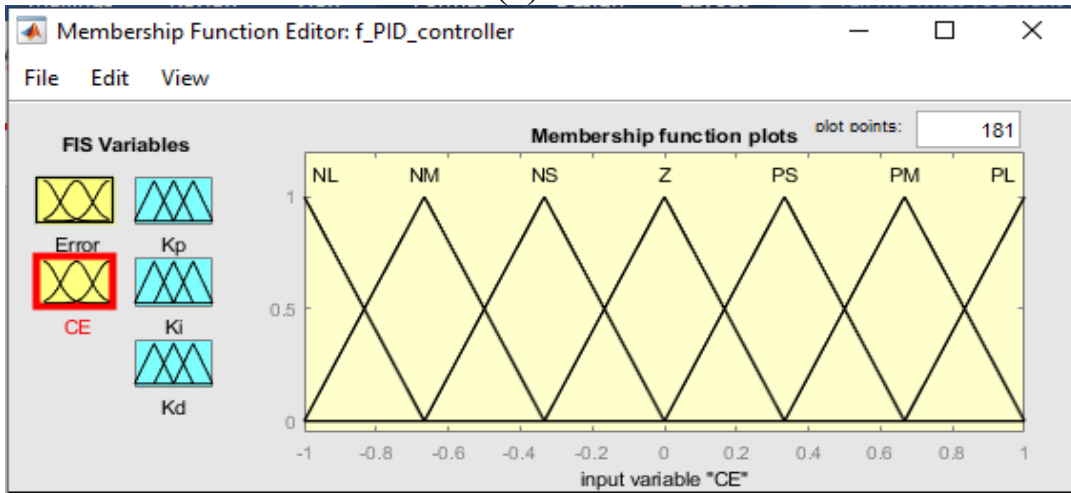
Zero (Z), Very Small (VS), Medium Small (MS), Medium (M), Medium Big (MB), Very Big (VB), Very Large (VL).

تمّ تصميم المتحكم Fuzzy-PID (C-joint1, C-joint2) لكل رابطة بسبع توابع انتماء

لكل من متغيرات الدخل/الخرج (الشكل 4-9)، (الشكل 4-10).

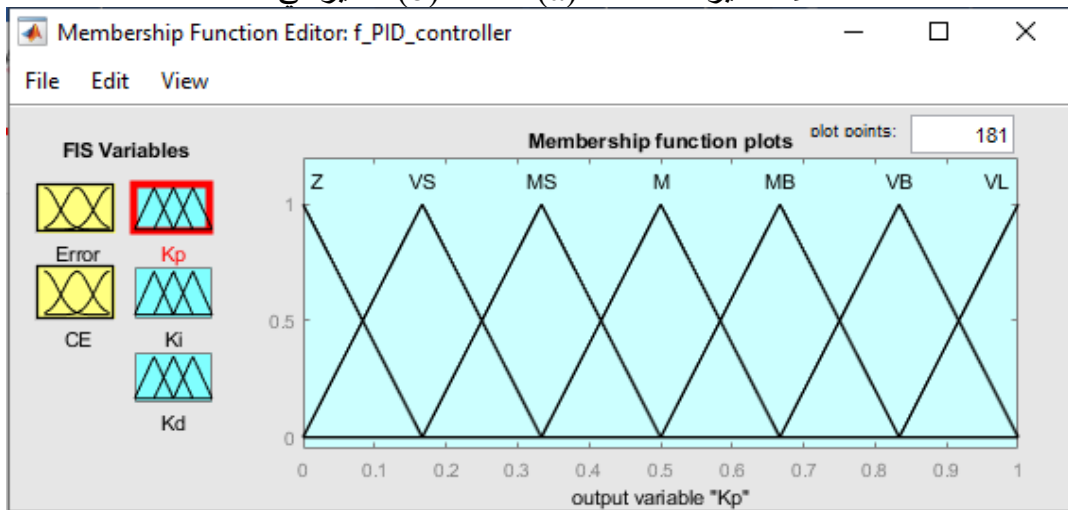


(a)

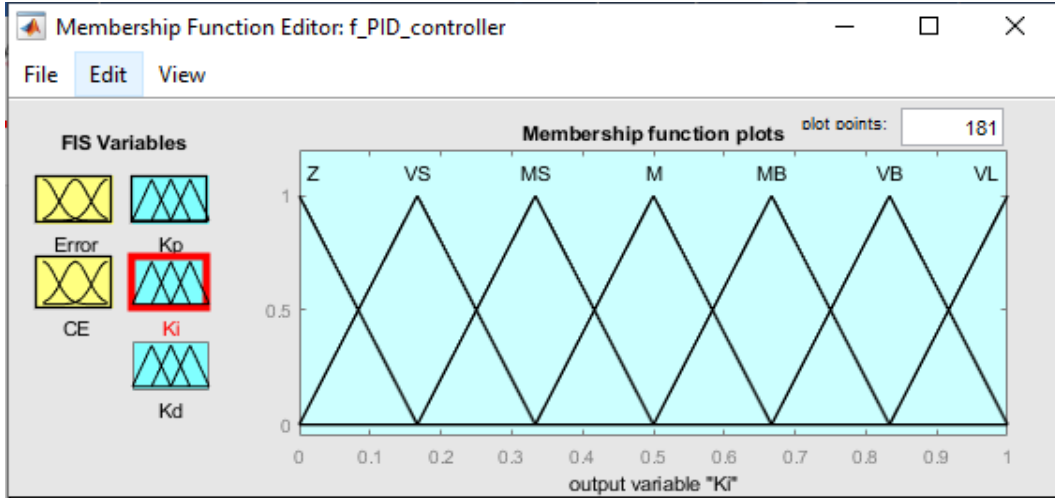


(b)

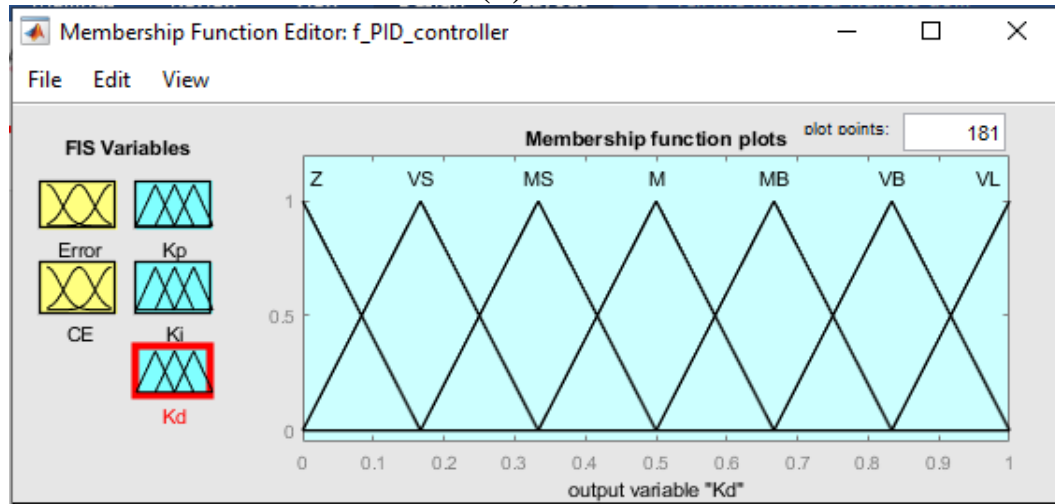
الشكل 4-9: متغيرات الدخل. (a) الخطأ، (b) التغير في الخطأ



(c)



(d)



(f)

الشكل 4-10: متغيرات الخرج. (c) الربح التناسبي، (d) الربح التكاملي، (f) الربح التفاضلي

قاعدة الأوامر مبنية وفق الشكل التالي (جدول 3-4، جدول 4-4، جدول 5-4):  
 IF input1 and input2 THEN output1 and output2 and output3.

جدول 3-4: اعادة الأوامر للربح التناسبي Kp

$\Delta E$	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
E	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NM	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NS	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PS	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PM	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
PL	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL

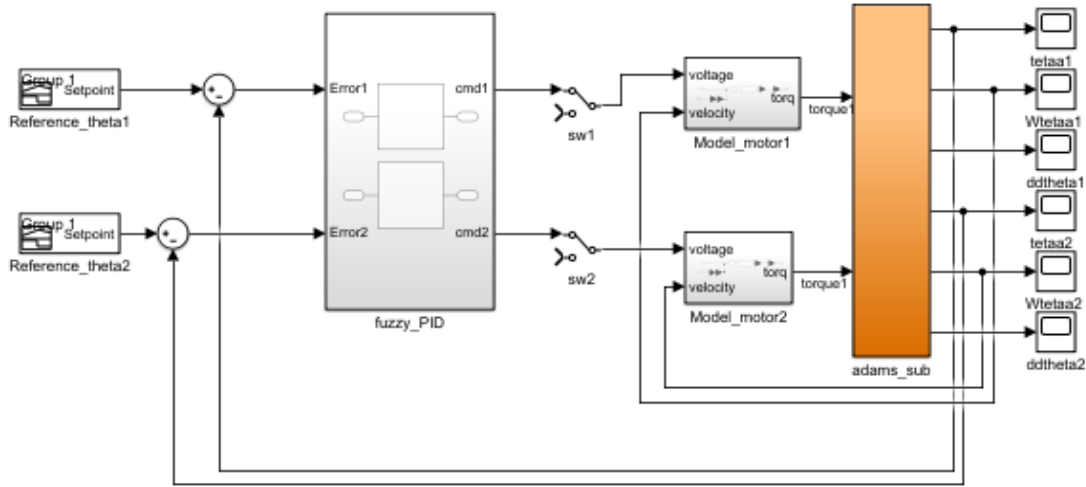
جدول 4-4: قاعدة الأوامر للربح التكاملي Ki

$\Delta E$ \ E	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	Z	Z	VS	VS	MS	M	M
NM	Z	Z	VS	MS	MS	M	M
NS	Z	VS	MS	MS	M	MB	MB
Z	VS	VS	MS	M	MB	VB	VB
PS	MS	MS	M	MB	MB	VB	VL
PM	M	M	MB	MB	VB	VL	VL
PL	M	M	MB	VB	VB	VL	VL

جدول 5-4: قاعدة الأوامر للربح التفاضلي Kd

$\Delta E$ \ E	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	MB	MS	Z	Z	Z	VS	MB
NM	MB	MS	Z	Z	Z	VS	MB
NS	M	MS	VS	VS	MS	MS	M
Z	M	MS	MS	MS	MS	MS	M
PS	M	M	M	M	M	M	M
PM	VL	MS	MB	MB	MB	MB	VL
PL	VL	VB	VB	VB	MB	MB	VL

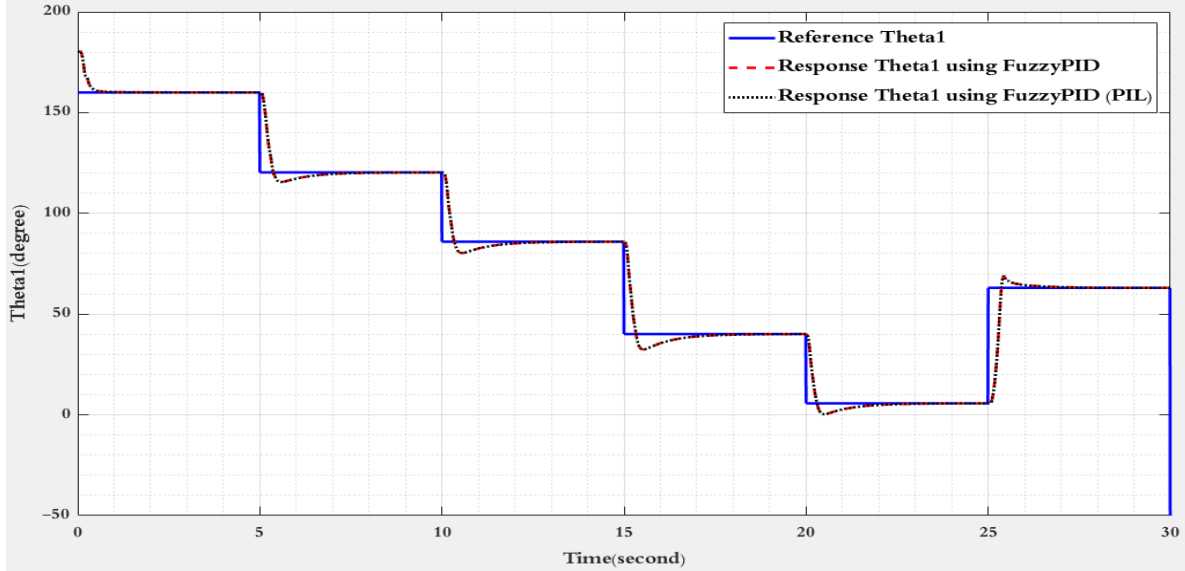
يُوضَّح (الشكل 4-11) حلقة التحكم المغلقة لكلا المفصلين باستخدام هذه الخوارزمية.



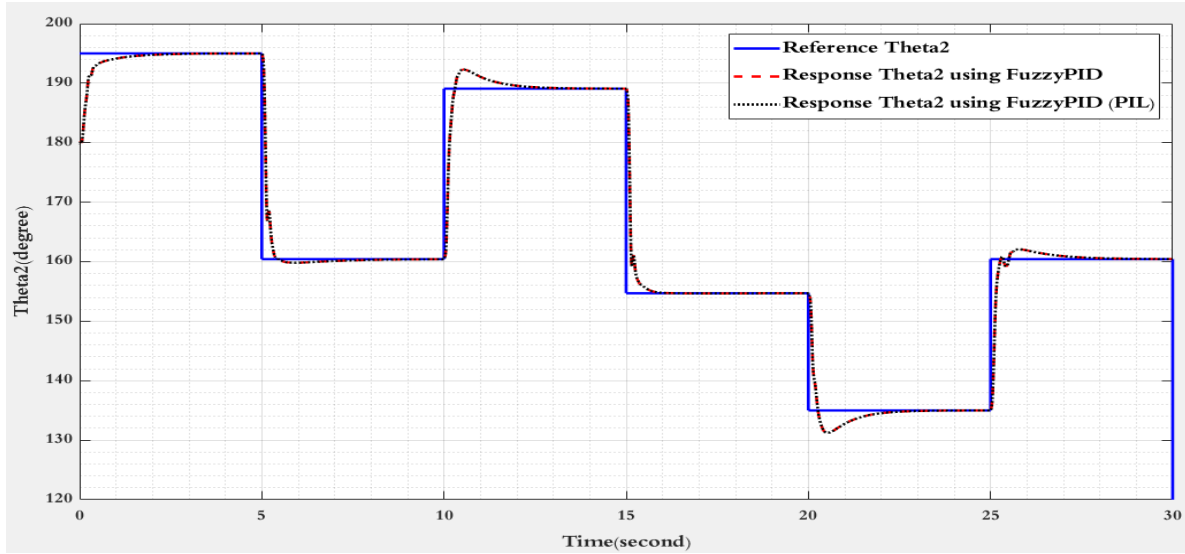
الشكل 4-11: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Fuzzy-PID

تمَّ تصميم متحكم Fuzzy-PID (C-joint1, C-joint2) لكل رابطة (الشكل 4-12). إنَّ قيم معاملات المتحكم PID تتراوح بين المجالات التالية  $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ ,  $[K_{imin}, K_{imax}]$ ,  $[K_{pmin}, K_{pmax}]$  على الترتيب، حيثُ تمَّ الاعتماد على القيم التي





(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 4-14: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Fuzzy-PID

بالمقارنة بين استجابة النموذج الافتراضي للأوامر المرسله من الخوارزمية والاستجابة للأوامر الصادرة عن البطاقتين، من خلال إجراء الطرح الحسابي بين هاتين الاستجابتين تبين لنا أنّ أداء الخوارزمية على هاتين البطاقتين يتطابق مع أدائها في بيئة Simulink دون فروقات تُذكر (الفروقات من مرتبة 0.001) مما يعني أن البطاقتين قادرتين على تنفيذ هذه الخوارزمية بشكل جيد عند استخدام زمن التقطيع نفسه.

## 6.4. تصميم المتحكم MPC

إنَّ تصميم المتحكم التنبؤي النموذجي كما ذكرنا سابقاً يتطلب وجود نموذج رياضي يصف أداء الجملة داخل المتحكم، عندها يتمكن المتحكم من التنبؤ بأداء الجملة المستقبلي، حيثُ تعتبر جملة النظام نفسها كجزء من نظام هذا المتحكم.

### 1.6.4. تصميم المتحكم Multiple Model MPC

اعتمدنا في تصميم المتحكم على معادلات الحالة للنظام (3.37)، (3.38)، (3.39)، (3.40) الذي يتكون من المعادلات الديناميكية للذراع ونموذجين لمحرك التيار المستمر المستخدمين (محرك لكل رابطة) لكي نتمكن من التنبؤ بسلوك الجملة في لحظات مستقبلية. بدايةً قمنا بإيجاد النماذج الخطية للجملة عند نقاط عمل محددة تنتمي إلى مجال عمل النظام حيثُ قمنا بتقسيم مجال عمل المفصل الأول إلى 5 مجالات جزئية تتمثل بالقيم التالية:

$$\Theta_1 = [\pi/6 \quad \pi/3 \quad \pi/2 \quad (4*\pi/6) \quad (5*\pi/6)]$$

أمَّا بالنسبة للمفصل الثاني تمَّ تقسيم مجال عمله إلى أربعة مجالات جزئية والتي تتمثل بالقيم التالية:

$$\Theta_2 = [-3*\pi/4 \quad -\pi/4 \quad \pi/4 \quad 3*\pi/4]$$

عندها أصبح لدينا 20 نموذج خطي للنظام لذا يجب تصميم مصفوفة متحكمات MPC لكل نموذج خطي من النماذج التي حصلنا عليها. وقد كانت كافيةً في تحريك المفاصل للمواضع المطلوبة في حين أن زيادة عدد المجالات المستخدمة لن يُفيدنا في تحسين استجابة النظام وقد أدى ذلك إلى عدم قدرة وحدة التحكم على اختيار المتحكم المناسب للعمل حول نقطة العمل المطلوبة وبالتالي زيادة خطأ الحالة المستقرة (عدم وصول المفاصل للمواضع المطلوبة).

لابدَّ لنا أيضاً من تحديد أفق التنبؤ الذي يقوم ضمنه المتحكم بحساباته للتنبؤ بالسلوك المستقبلي للجملة، أي أنه كلما انقضت لحظة حالية أضاف المتحكم إلى قاعدة بياناته معلومة جديدة من لحظة أكثر تقدماً من المستقبل المنظور بالنسبة له. عندها فإن عملية التنبؤ يجب أن تضمن استقرار النظام في نهاية المطاف. تمَّ اختيار قيمة أفق التنبؤ  $Np = 35$ ، وأفق التحكم  $Nc = 3$ ، وكما ذكرنا سابقاً أن هذا المتحكم يتميز بقدرته على التعامل مع القيود التي يفرضها النظام على جملة التحكم وهدف المصمم أن يُبقي متحكمه القيم التي يتنبأ بها ويجري عليها عمليات الأمثلية ضمن حدود هذه القيود دون تجاوزها والتي تتمثل وفق مايلي:

القيود على دخل الجملة (دخل المحرك "الجهد المطبق"):

$$-24 \leq u(1) \leq 24 \quad , \quad -24 \leq u(2) \leq 24$$

لإتمام عملية التصميم يجب إضافة مصفوفة توزيع لخرج النظام والتي بدورها توضح أولويات التحكم للمتحكم التنبؤي وبما أن في هذا العمل كلا خرجي الجملة بنفس الأهمية لذا تمَّ

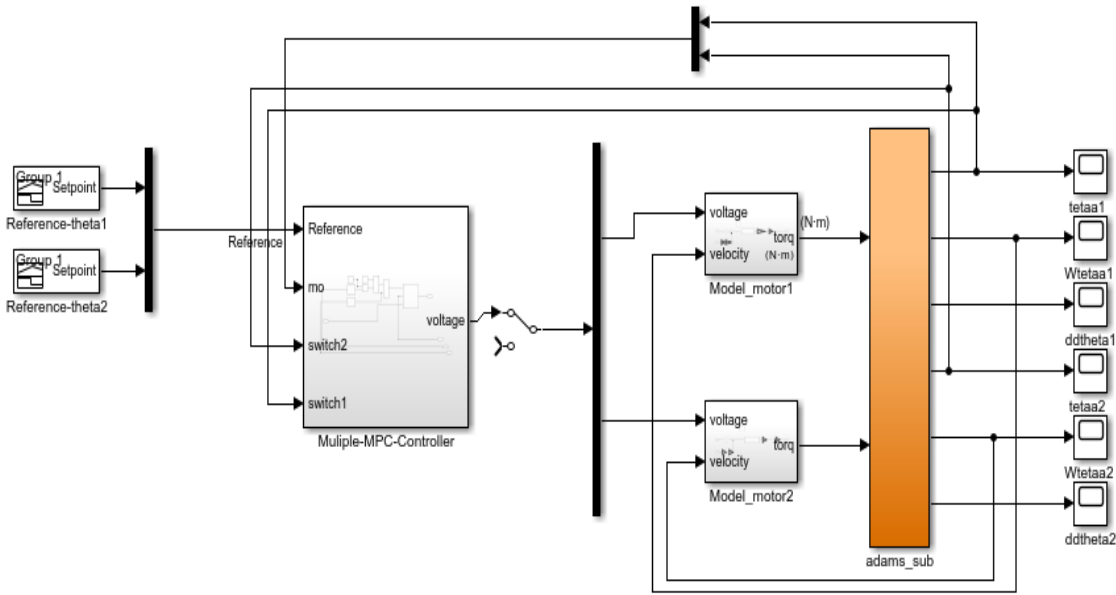
توزين كل منهما بالقيمة 1. كما يجب علينا تعريف ما يسمى scale factor لكل من إشارتي دخل وخرج النظام والذي يعتبر ضرورياً خاصةً عندما تكون قيم هذه المتغيرات مختلفة، وعادةً يجب أن يكون مجاله مساوياً للفرق بين أعلى قيمة لهذا المتغير وأدنى قيمة له. وبالتالي يكون لدينا

- Scale factor لدخل النظام يكون ضمن المجال [50, 50] وذلك لأن دخل المحرك بين  $[-24, 24]v$ .

- Scale factor لخرج النظام ضمن المجال [3, 6] وذلك لأنّ خرج المفصل الأول  $[0, 180^\circ]$  وخرج المفصل الثاني  $[0, 360^\circ]$ .

وبذلك نكون قد حددنا جميع المعاملات الخاصة بتصميم هذا المتحكم وبما أنّه من النوع MIMO لذا يكفي تصميم متحكم وحيد بدخلين وخرجين للتحكم بنموذج الذراع.

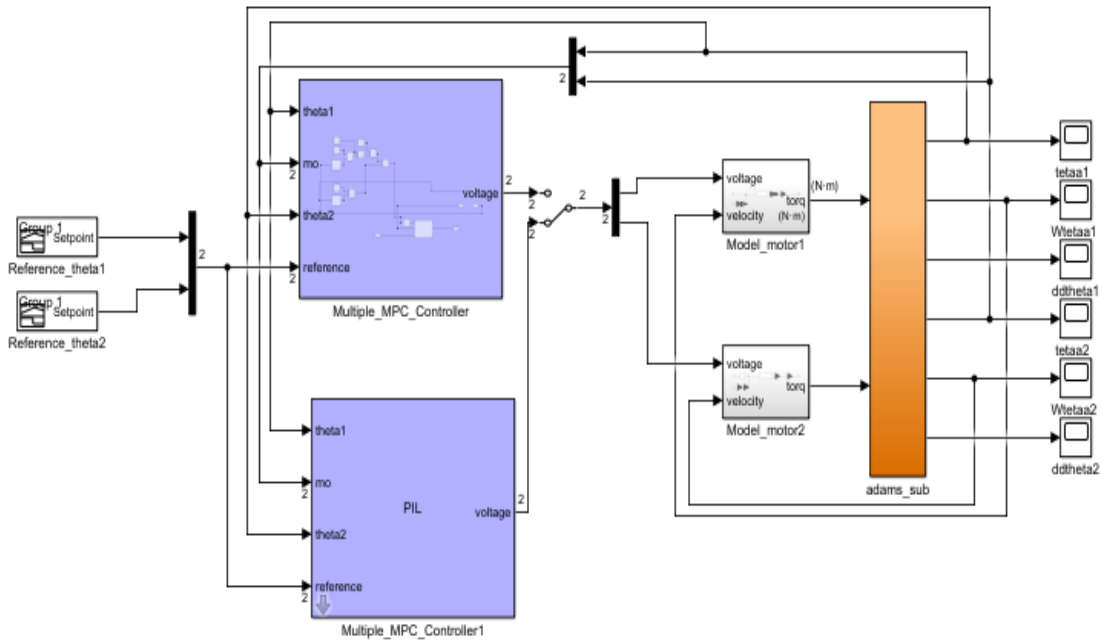
يُوضّح (الشكل 4-15) حلقة التحكم في الحلقة المغلقة باستخدام هذا المتحكم الذي يعتمد بشكل أساسي كما ذكرنا سابقاً على نموذج النظام الخطي عند نقط عمل مختلفة.



الشكل 4-15: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Multiple Model MPC

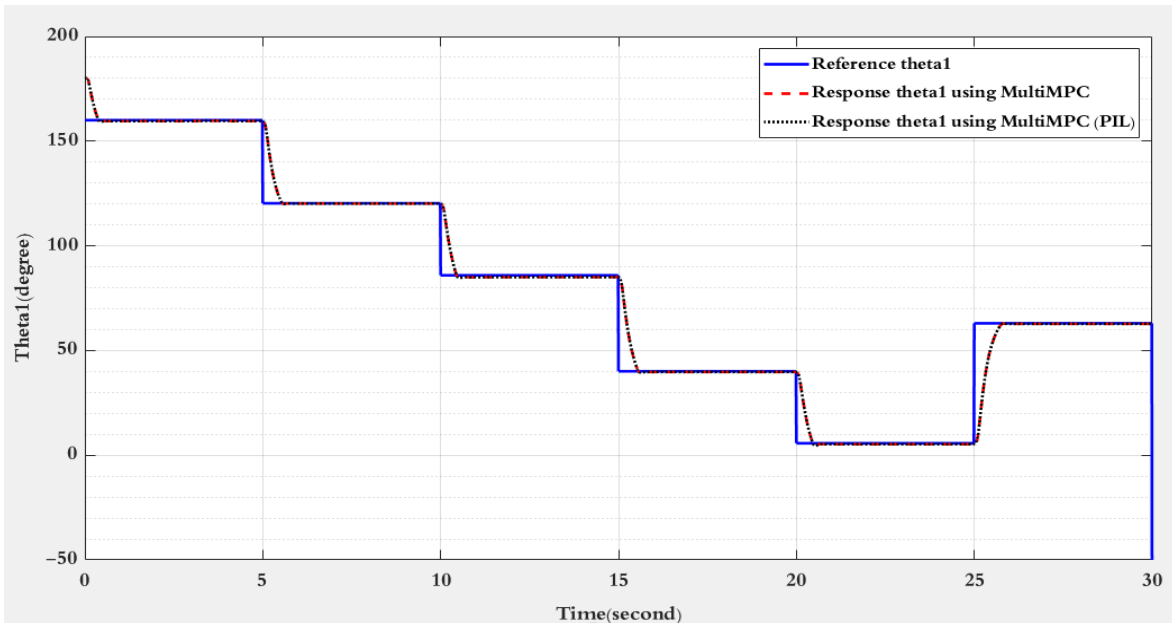
تتضمن حلقة التحكم النموذج الافتراضي، نموذجي محرك تيار مستمر DC، متحكم واحد Multiple MPC والإشارات المرجعية المستخدمة في حلقات التحكم السابقة.

بعد تصميم المتحكم فُمنّا بتشغيله مباشرةً على بطاقة راسبري باي باستخدام المحاكاة PIL، يُوضّح (الشكل 4-16) حلقة التحكم لكلا المحاكاتين ضمن بيئة ماتلاب.

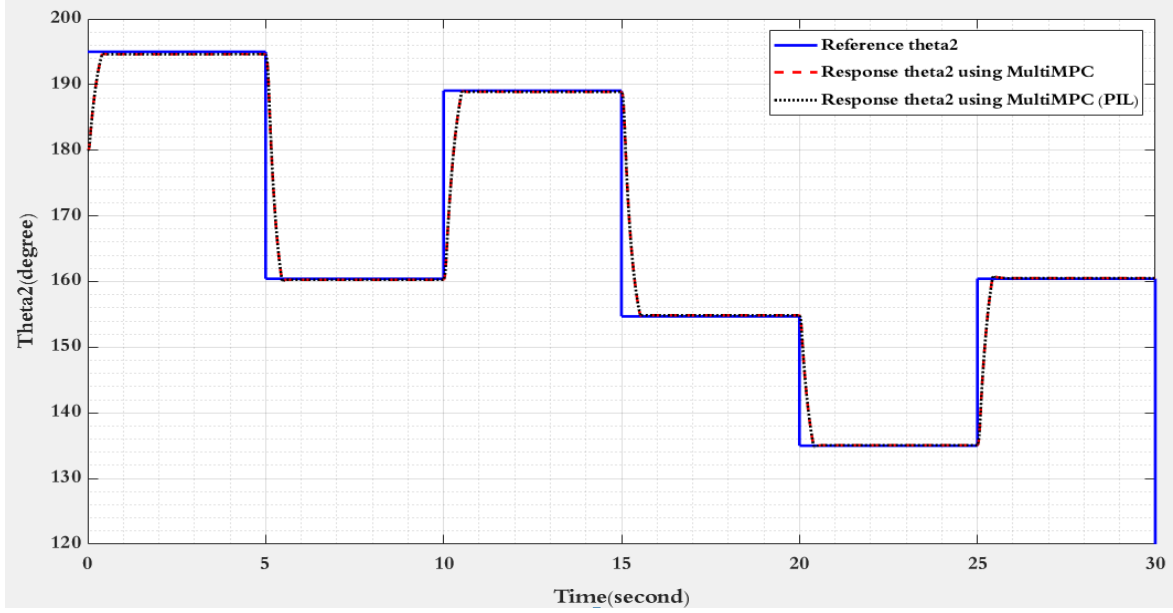


الشكل 4-16: حلقة التحكم المغلقة باستخدام Multiple-MPC-Controller مع المحاكاة PIL

يُوضَّح (الشكل 4-17) استجابة المفصلين لأوامر التحكم الصادرة عن وحدة التحكم Adaptive-MPC والاستجابة عند تطبيق المحاكاة PIL.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

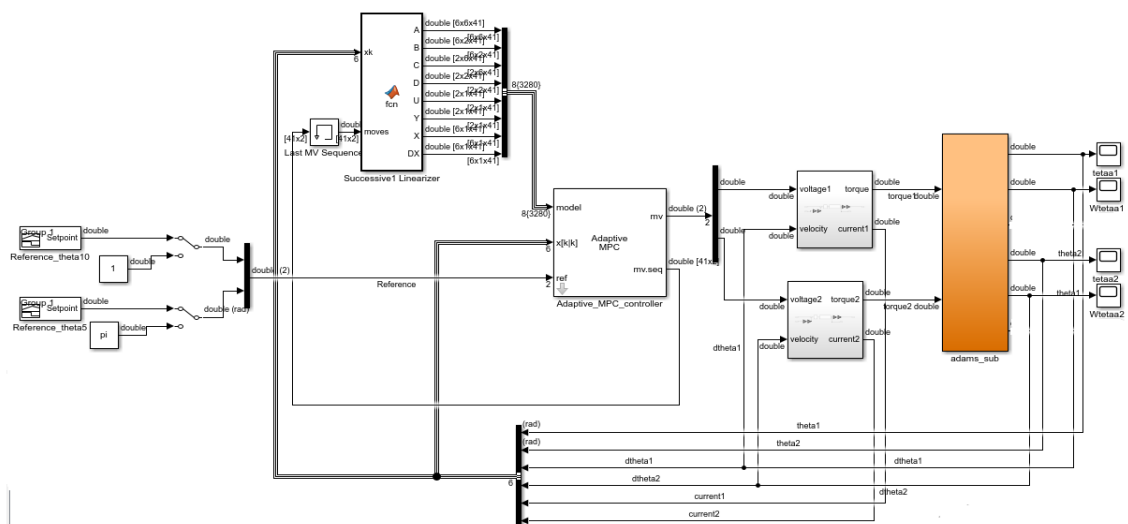
الشكل 4-17: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Multi-MPC

بالمقارنة بين استجابة النموذج الافتراضي للأوامر المرسله من الخوارزمية والاستجابة للأوامر الصادرة عن البطاقة R-PI، تبين لنا أن أداء الخوارزمية على البطاقة يتطابق مع أدائها في بيئة Simulink دون فروقات تذكر مما يعني أن البطاقة قادرة على تنفيذ هذه الخوارزمية بشكل جيد عند استخدام زمن التقطيع نفسه.

## 2.6.4. تصميم المتحكم Adaptive MPC

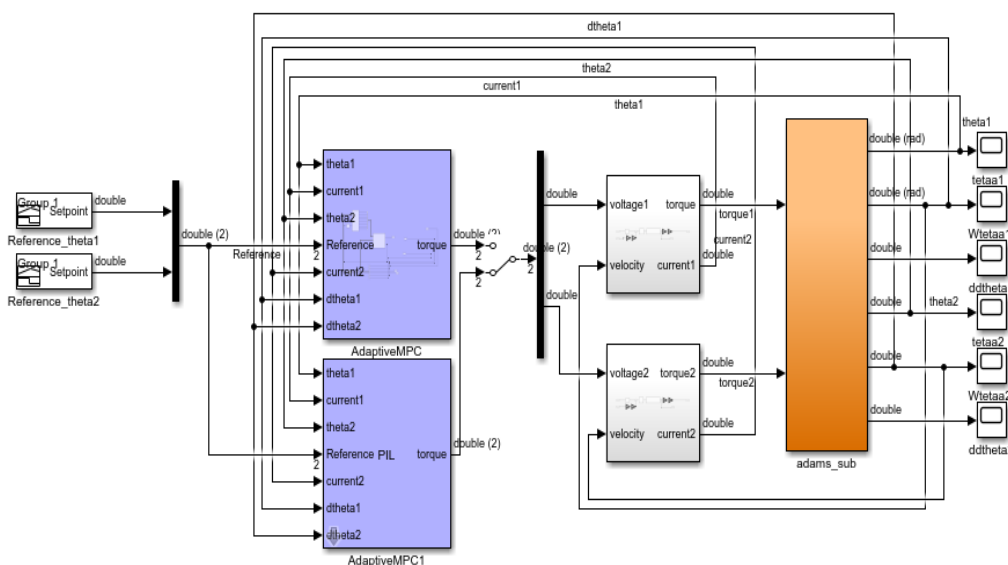
إنّ تصميم المتحكم التنبؤي التكيفي لا يتطلب إيجاد نماذج خطية للجملة عند نقاط عمل وإنما سيتم الاعتماد على النموذج اللاخطي للجملة ومصفوفة جاكوبي التي تتمثل بمشتقات معادلات الحالة التي تهدف إلى تعديل حالة النظام عند كل شعاع حالة. تمّ تحديد معاملات هذا المتحكم بحيث تكون مماثلة للمتحكم Multi-MPC (أفق التنبؤ، أفق التحكم، قيود الدخل، scale factor، مصفوفة أوزان خرج الجملة).

يُوضّح (الشكل 4-18) حلقة التحكم المغلقة لهذا المتحكم.



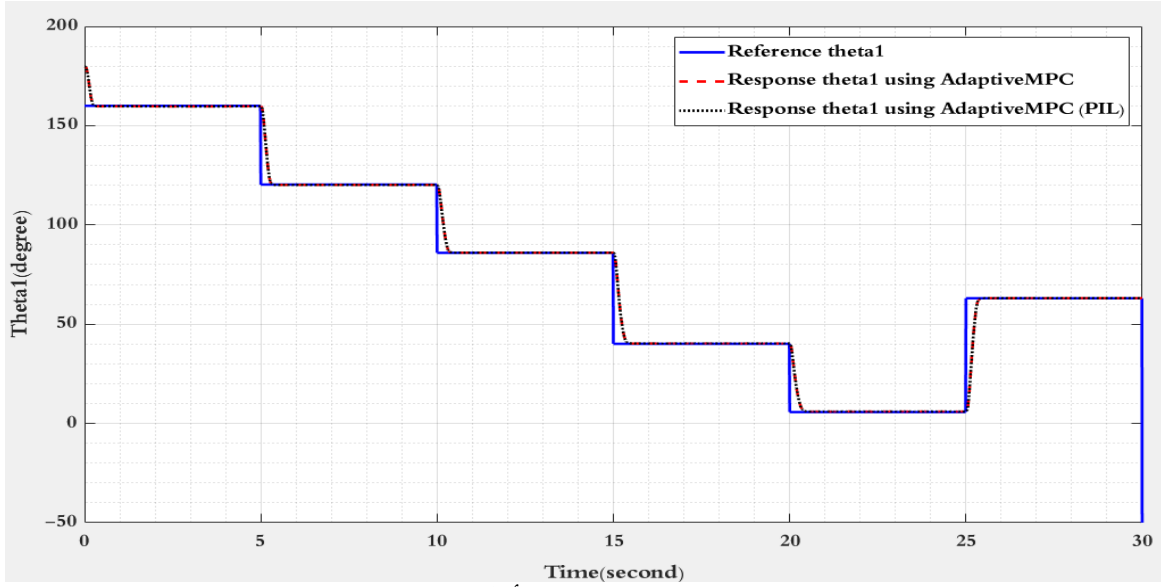
الشكل 4-18: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Adaptive-MPC

بعد ذلك تمّ تحميل هذا المتحكم على بطاقة راسبري باي باستخدام المحاكاة PII فنحصل على حلقة التحكم التي تتضمن كلا المحاكاتين (الشكل 4-19).

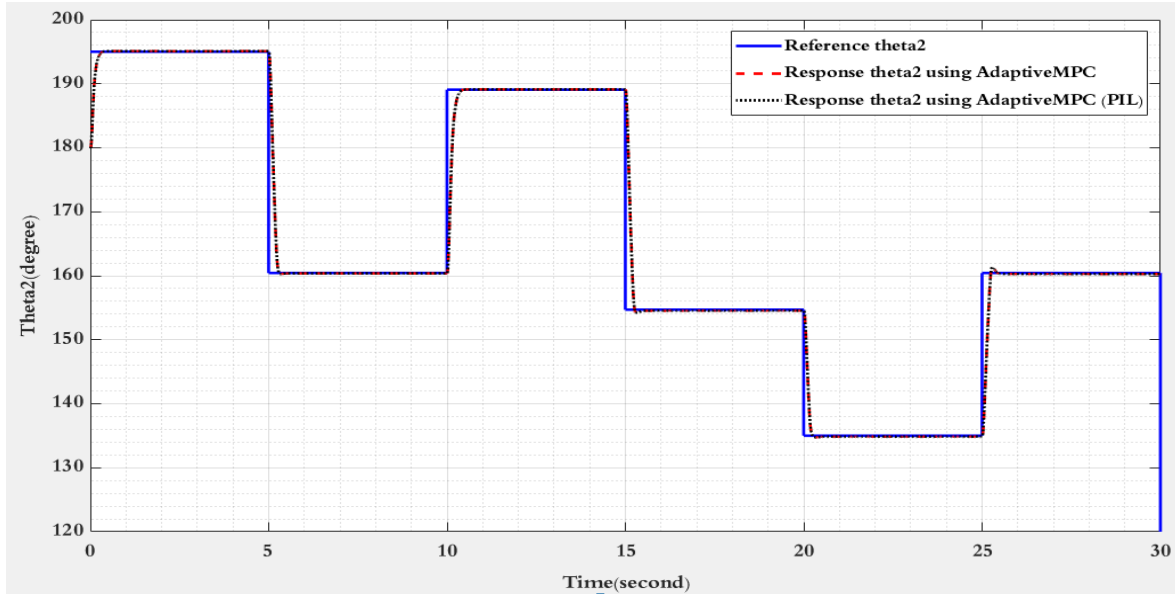


الشكل 4-19: حلقة التحكم المغلقة باستخدام وحدة التحكم Adaptive-MPC مع المحاكاة PII

يُبيّن (الشكل 4-20) استجابة المفصلين لأوامر التحكم الصادرة عن وحدة التحكم MPC-Adaptive والاستجابة عند تطبيق المحاكاة PIL.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 4-20: استجابة النظام لأوامر التحكم باستخدام المتحكم Adaptive-MPC

## 7.4. الخلاصة

تمّ في هذا الفصل عرض مقدمة تتضمن أهمية النمذجة التشاركية، مع ذكر خطوات تنفيذها من أجل الربط بين النموذج الافتراضي الذي تمّ بناؤه في بيئة ADAMS والمتحكمات التي تمّ بناؤها في بيئة MATLAB-SIMULINK. قمنا بداية بتصميم المتحكم PID متعدد النماذج ثمّ

تصميم المتحكم الهجين Fuzzy-PID بالإضافة إلى تصميم المتحكمين التنبئيين: المتحكم التنبئي متعدد النماذج Multi-MPC والمتحكم التنبئي التكيفي Adaptive-MPC وتمّ تطبيق هذه المتحكمات على الذراع ورسم الاستجابة لها في المجال الزمني. وبعد ذلك تمّ تصدير المتحكمات السابقة إلى بطاقة Raspberry Pi باستخدام تقنية PIL التي يدعمها برنامج MATLAB-SIMULINK والتي تتيح عملية الترجمة الآلية لهذه المتحكمات لاختبار صحة تنفيذها على الحواسيب المصغرة.

# الفصل الخامس

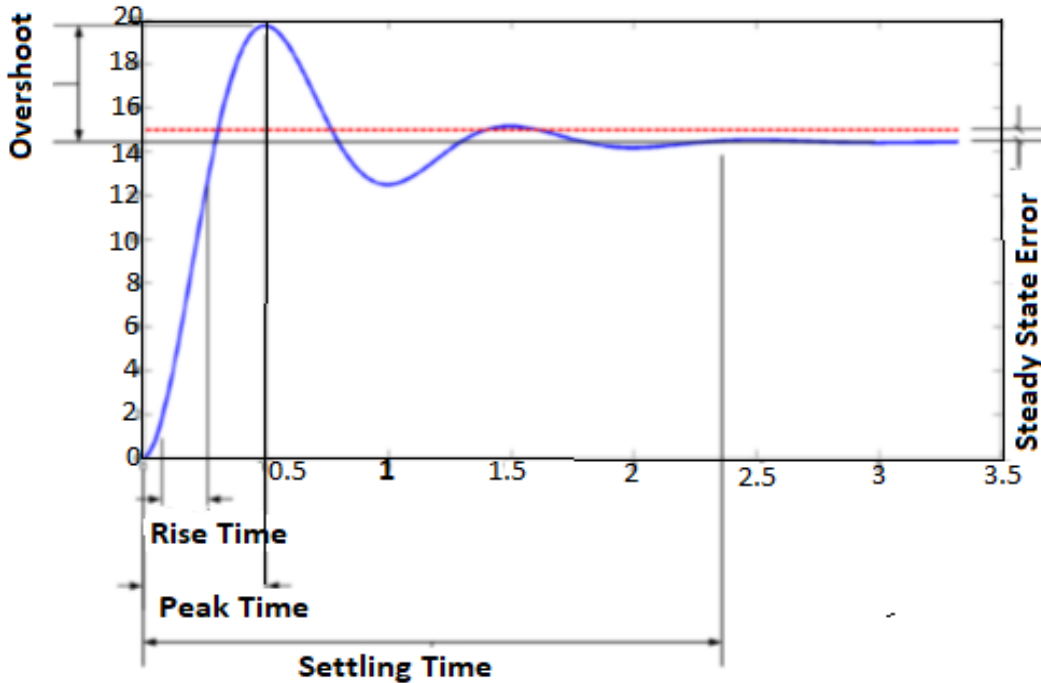
## 5. نتائج المحاكاة

سيتم في هذا الفصل مناقشة النتائج التي حصلنا عليها من تنفيذ المتحكمات السابقة على الذراع، ثم إيجاد أزمنة تشغيل هذه الخوارزميات على الحواسيب المصغرة بهدف حساب تردد العمل الأعظمي لكل منها.

## 1.5. معايير تقييم أداء خوارزميات التحكم الآلي في المجال الزمني

يتم تقييم أداء خوارزميات التحكم الآلي لأي نظام من خلال عدة معايير تعتمد على الخصائص المميزة لاستجابة الحلقة المغلقة في المجال الزمني لدخل خطوي (الشكل 5-1) والتي تتمثل بما يلي [2]:

1. زمن الاستجابة (Tr) Response Time: هو الزمن اللازم للوصول إلى 90% من قيمة الاستجابة الزمنية للنظام.
2. التجاوز Overshoot: تتمثل بالنسبة بين قيمة المطال الأعظمي والقيمة النهائية للاستجابة.
3. الخطأ السكوني (ESS) Steady State Error: خطأ الحالة الثابتة يجب أن يكون معدوم.
4. زمن الاستقرار (Ts) Settling time: الزمن اللازم ليستقر خرج النظام 5% من قيمته النهائية.
5. صلادة التحكم في حال وجود اضطرابات (أي يحقق التحكم تكرارية عالية لأداء النظام بوجود الاضطرابات وأخطاء النمذجة).



الشكل 5-1: خصائص الاستجابة الخطوية في المجال الزمني

## 2.5. العمل التجريبي (سيناريو التجارب المطبقة)

تمّ دراسة استجابة المفاصل للأوامر الصادرة عن المتحكمات المصممة سابقاً بالاعتماد على المعايير التي ذكرناها في الفقرة (2.5)، من أجل تقييم أداء هذه المتحكمات وتفسير نتائج المحاكاة التي حصلنا عليها.

تمّ تحريك مفصلي الذراع في الوقت ذاته وتطبيق عدة إشارات على دخل حلقة التحكم (مواضع مرجعية):

- بدايةً: لم يتم تحميل الذراع بأي حمل إضافي وقُمنّا بتطبيق إشارات مرجعية خطوية Step وكما قُمنّا بتطبيق إشارات دخل Ramp ومُلاحظة استجابة هذه المفاصل للمتحكمات وأيضاً ملاحظة أثر الترابط بين هذين المفصلين على استجابة بعضهما البعض والمقارنة بينها وتمثيلها بيانياً واستنتاجنا منها جدول يتضمن قيم المعايير السابقة.
- ثانياً: تمّ تحميل الذراع بمجموعة أحمال وقُمنّا بتطبيق إشارات مرجعية خطوية ومُلاحظة أثر هذه الأحمال وأثر الترابط على استجابة المفاصل للمتحكمات لإيجاد المتحكم الأكثر صلادة (أي المتحكم الذي لا يتأثر بشكل كبير للتغيرات التي تطرأ على الذراع).

الإشارات المرجعية التي تمّ تطبيقها تتمثل وفق (جدول 5-1).

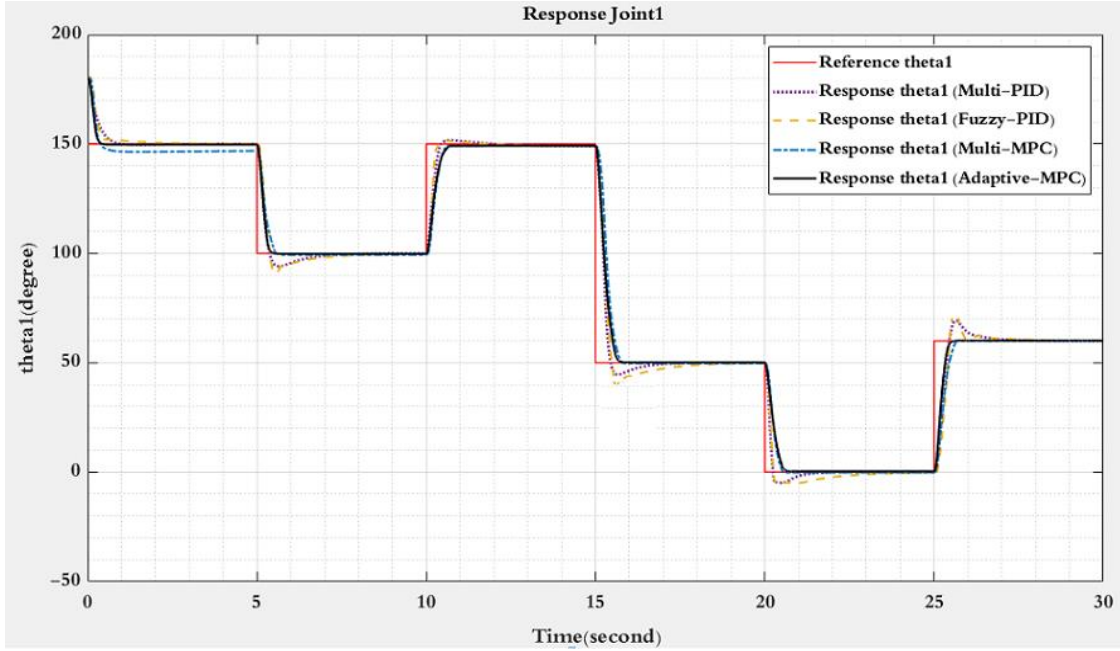
جدول 5-1: الإشارات الخطوية المطبقة

الإشارات الخطوية المطبقة (step)	
المفصل الأول	المفصل الثاني
150°	200°
90°	150°
150°	80°
50°	150°
0°	150°
50°	90°
إشارة (Ramp) بميل 6°/s	
المفصل الأول	المفصل الثاني
[90°, 120°]	[150°, 180°]

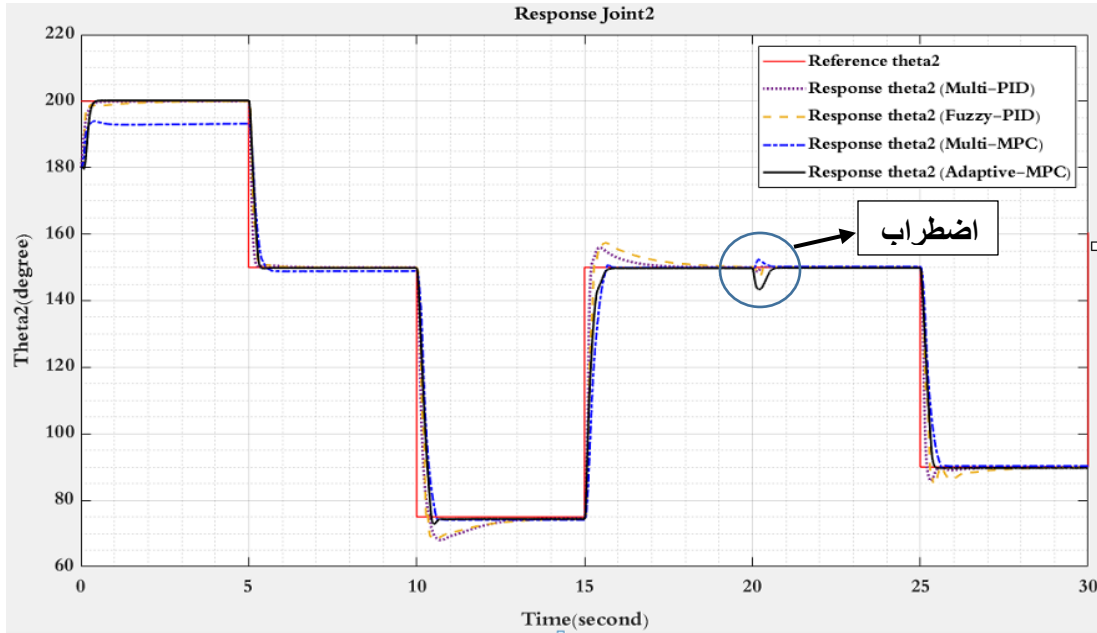
## 1.2.5. دراسة الاستجابة بدون وجود حمل

### 1.1.2.5. إشارة دخل خطوية بدون حمل

تم تطبيق إشارات خطوية على دخل النظام ورسم استجابة المفصلين وذلك باستخدام جميع المتحكمات فحصلنا على (الشكل 2-5)



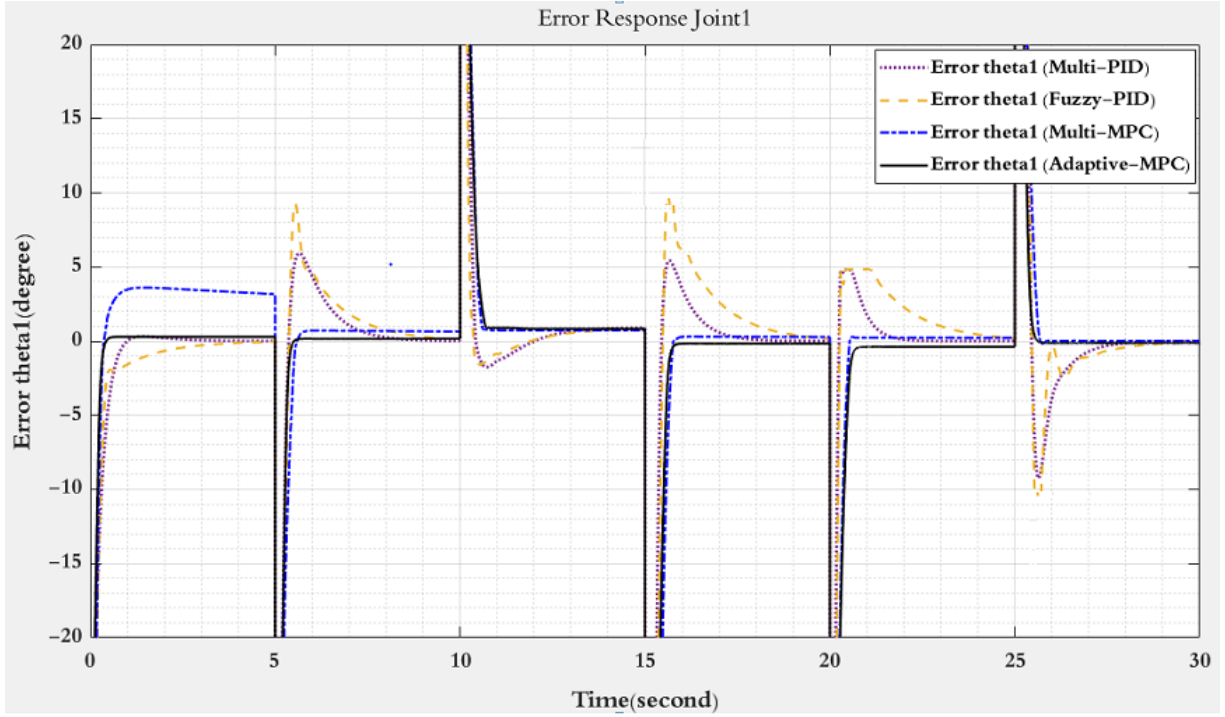
(a). استجابة المفصل الأول



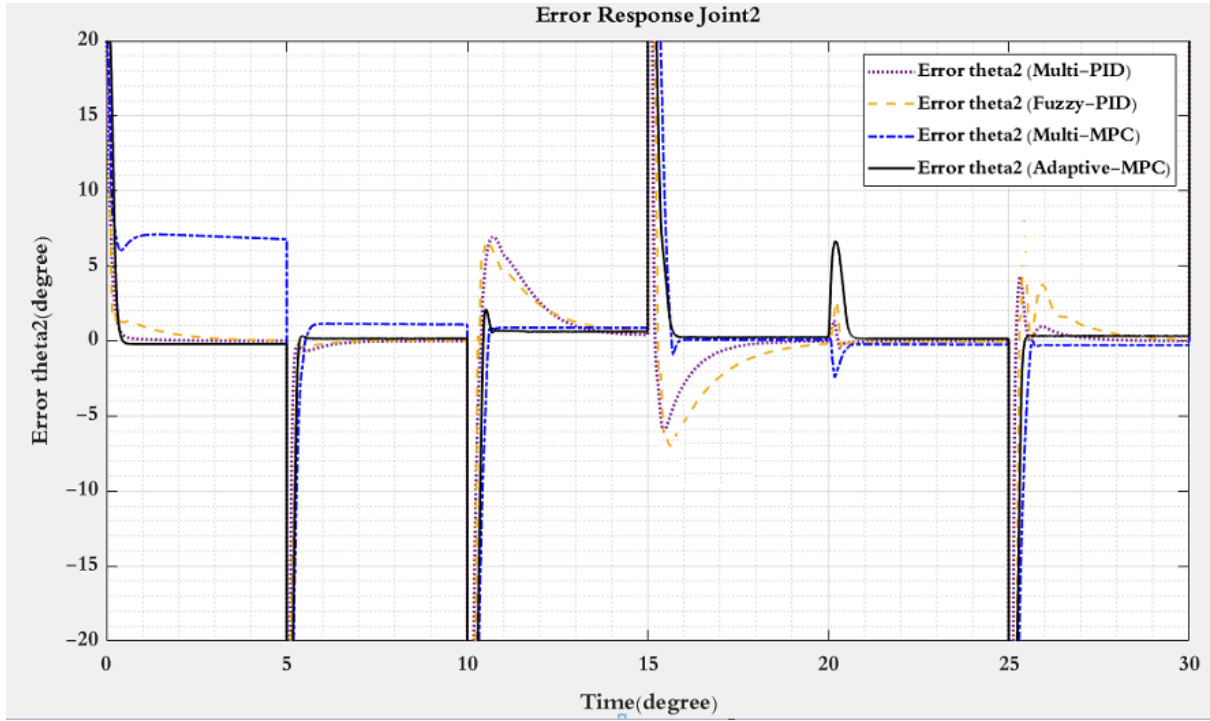
(b) استجابة المفصل الثاني

الشكل 2-5: استجابة كلا المفصلين لأوامر التحكم الصادرة عن المتحكمات

يُبيّن (الشكل 5-3) إشارة الخطأ الناتجة عن الدخل الخطوي الذي تمّ تطبيقه على كلا المفصلين



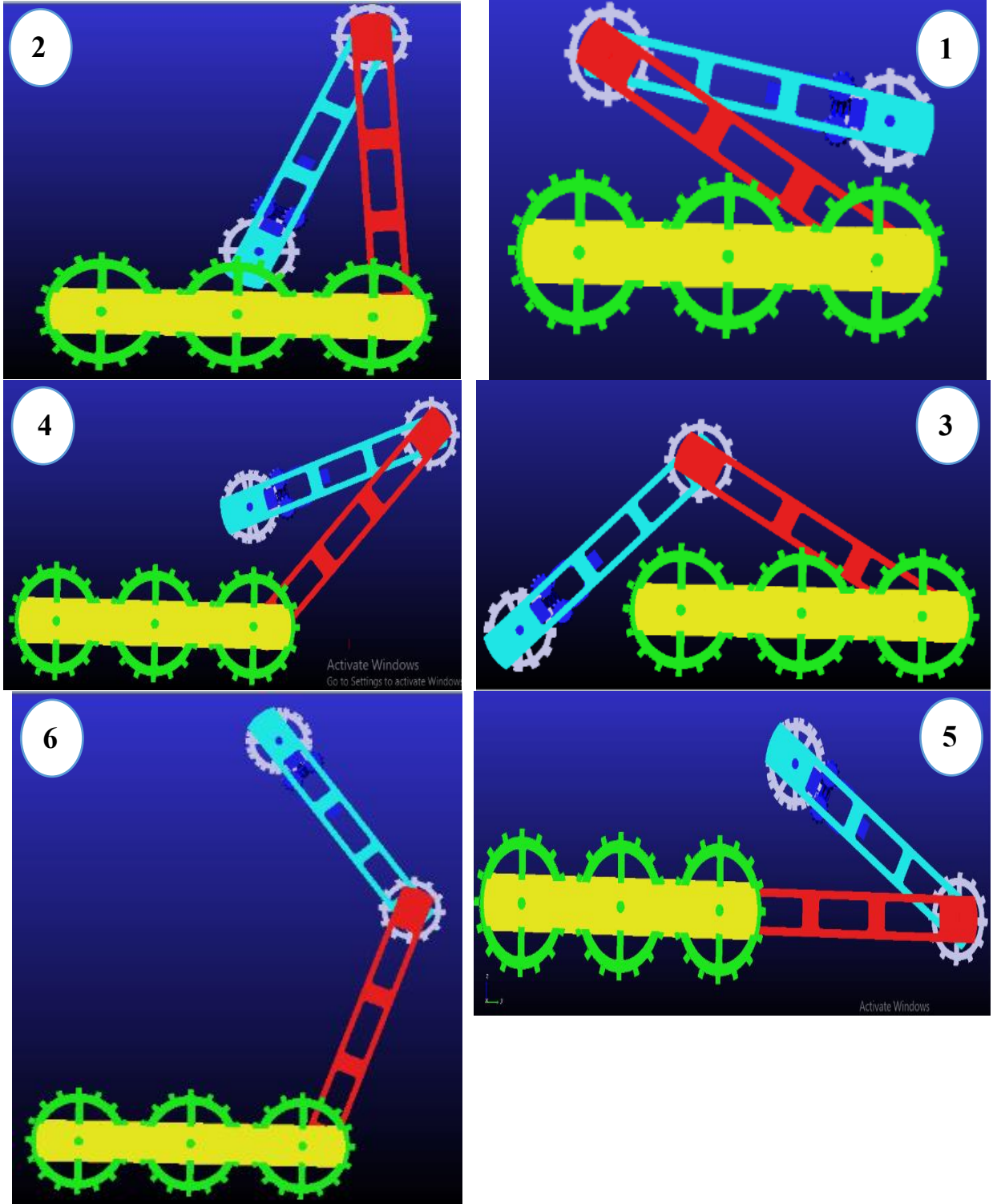
(a) إشارة خطأ المفصل الأول



(b) إشارة خطأ المفصل الثاني

الشكل 5-3: إشارة الخطأ لكلا المفصلين عند تطبيق دخل خطوي

يوضّح (الشكل 4-5) وضعية المفاصل عند تطبيق الإشارات الخطوية السابقة بالترتيب:



الشكل 4-5: أوضاع المفاصل بحسب الدخول الخطوي المطبق

في اللحظة  $t=0$  s، عند تحريك المفصل الأول للزاوية  $150^\circ$  والمفصل الثاني بزاوية صغيرة من  $180^\circ$  إلى  $200^\circ$  (الوضعية 1) نلاحظ أنّ جميع المتحكمات تعمل بشكل جيد فهي متقاربة الاستجابة وليس فيها فروقات كبيرة وذلك لأن المفصل الثاني بوضعية لا تؤثر بشكل كبير على حركة المفصل الأول باستثناء المتحكم Multi-MPC حدث فيه خطأ سكوني ثابت من مرتبة  $4^\circ$  للمفصل الأول و  $6^\circ$  للمفصل الثاني والسبب في ذلك هو بعد النماذج الخطية التي تمّ إيجادها عند تصميمه عن النموذج الخطي للذراع عند الزاويتين  $(150^\circ, 200^\circ)$ ، وفي نفس الوقت لا يمكننا زيادة عدد النماذج الخطية وذلك لأن أحد نقاط الضعف لهذا المتحكم هو الانتقال الفجائي للموديل مما يسبب حدوث اهتزاز في استجابة النظام.

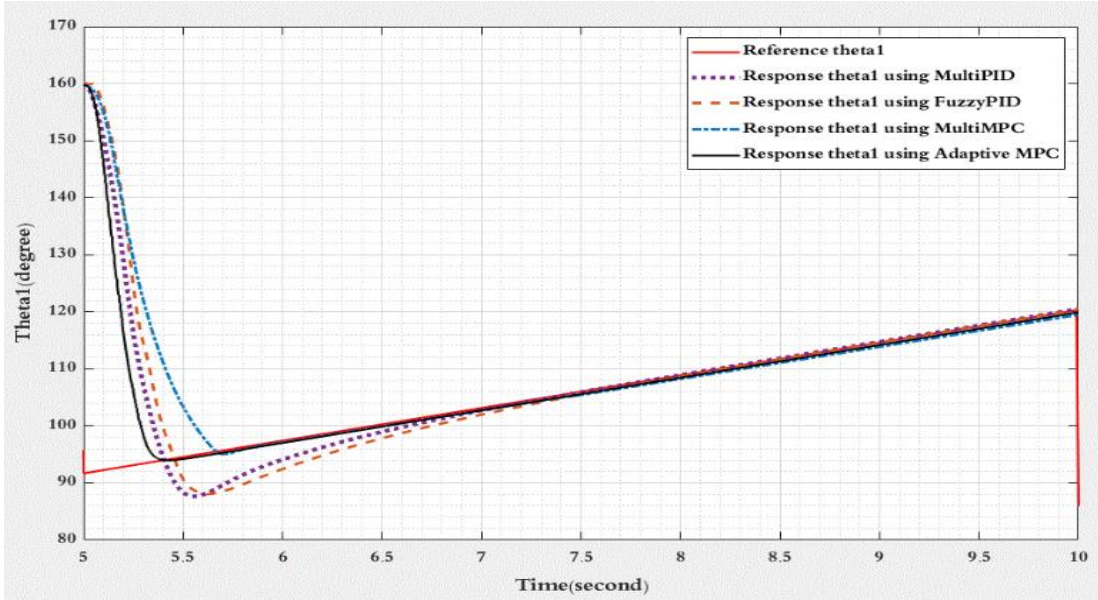
في اللحظة  $t=5$  s، (الوضعية 2) ظهرت فروقات واضحة من حيث التجاوز في استجابة المفصل الأول للمتحكمات (Multi-PID, Fuzzy-PID) مقارنة باستجابة المتحكمين الآخرين وذلك بسبب تأثره بعتالة المفصل الثاني (معاملات المتحكم PID يتم ضبطها بقيم ثابتة لا تأخذ بعين الاعتبار الترابط بين حركتي المفصلين)، بينما كانت استجابة المفصل الثاني لجميع المتحكمات جيدة ومتقاربة وليس فيها فروقات كبيرة بسبب عدم تأثره بوضعية المفصل الأول. في اللحظات  $t=10 \rightarrow 30$  s (الوضيعات 3 و 4 و 5 و 6) نلاحظ أنّ استجابة المفصلين للمتحكمين (Multi-PID, FUZZY PID) كانت مختلفة عن استجابة المتحكمين الآخرين وحدث فيها تجاوز من مرتبة  $10^\circ$ ، بينما استجابة المتحكمين (Multi-MPC, Fuzzy-MPC) تقريباً متماثلة دون فروقات كبيرة وذلك بسبب تأثر استجابتهما بالترابط بين المفصلين بشكل بسيط جداً (أثر الترابط بين المفصلين يكون تقريباً مهملاً).

لكن في اللحظة  $t=20$ s، (الوضعية 5) عندما تمّ تثبيت موضع المفصل الثاني عند الزاوية  $150^\circ$  وتحريك المفصل الأول باتجاه الموضع  $0^\circ$  نلاحظ ظهور اضطراب في حركة المفصل الثاني بالنسبة لجميع المتحكمات ومن ثمّ عودته للموضع المطلوب.

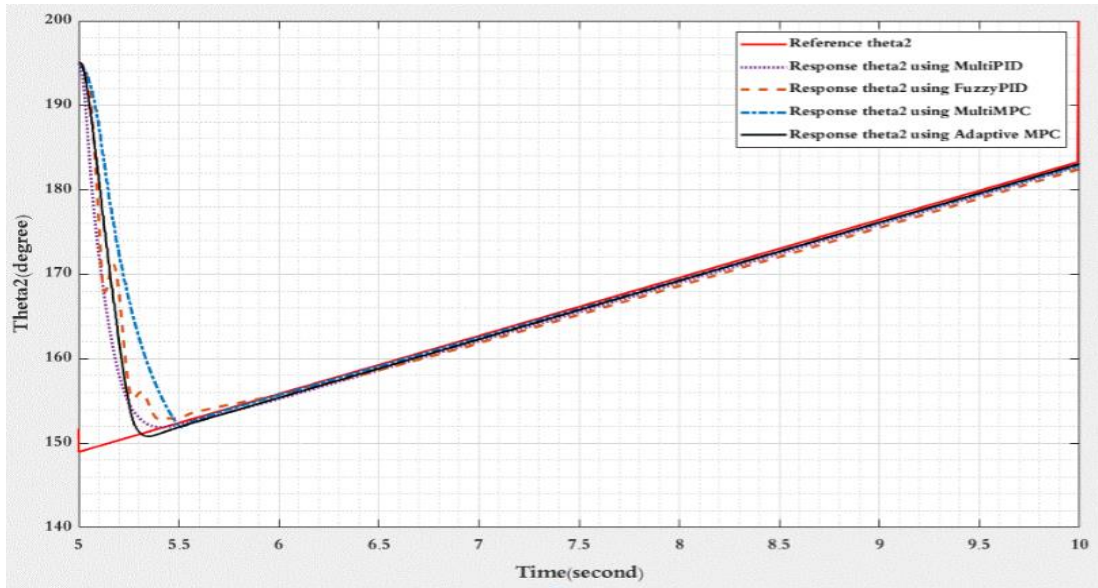
نُلاحظ من إشارات الخطأ الموضحة في (الشكل 5-3) أنّ المتحكم Adaptive-MPC يُقدّم أفضل استجابة لكلا المفصلين من حيث سرعة الاستجابة والتجاوز والخطأ السكوني وزمن الاستقرار، ويعود ذلك إلى أنّ هذا المتحكم يستخدم النموذج الرياضي اللاخطي للذراع في توليد جميع مصفوفات النماذج الخطية اللازمة خلال أفق التنبؤ، وبالتالي فإنّ أي تغيير يطرأ على خرج النظام يُؤخذ بعين الاعتبار في حساب هذه المصفوفات أي أنّه يأخذ بعين الاعتبار الترابط بين حركتي المفصلين.

### 2.1.2.5. إشارة دخل متغيرة خطياً بدون حمل

نطبق إشارة Ramp على الدخل فنحصل على استجابة جميع المتحكمات الموضحة في (الشكل 5-5):



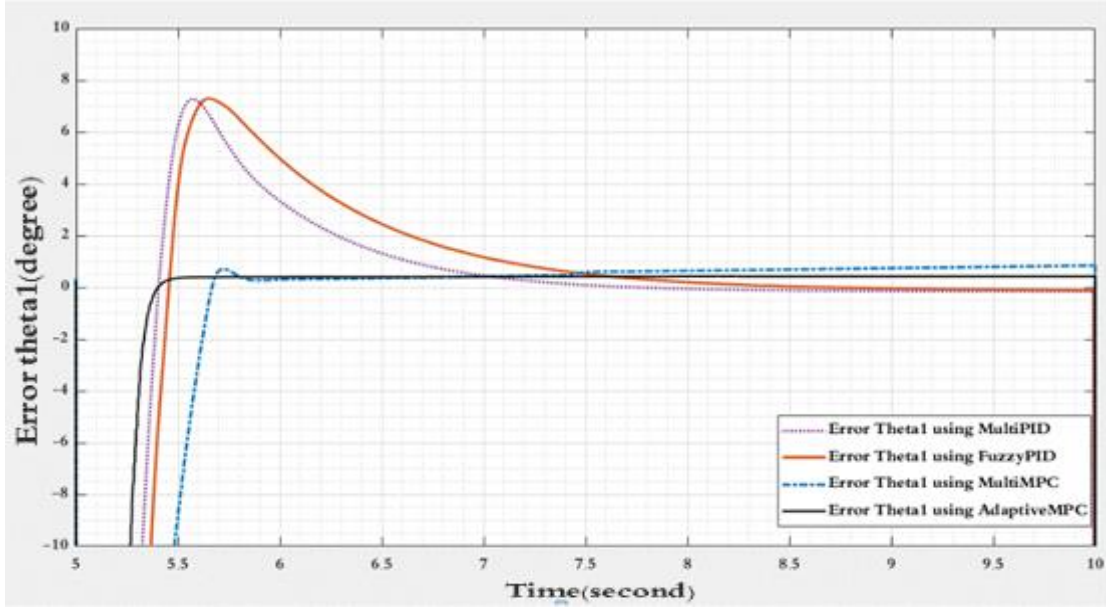
(a) المفصل الأول



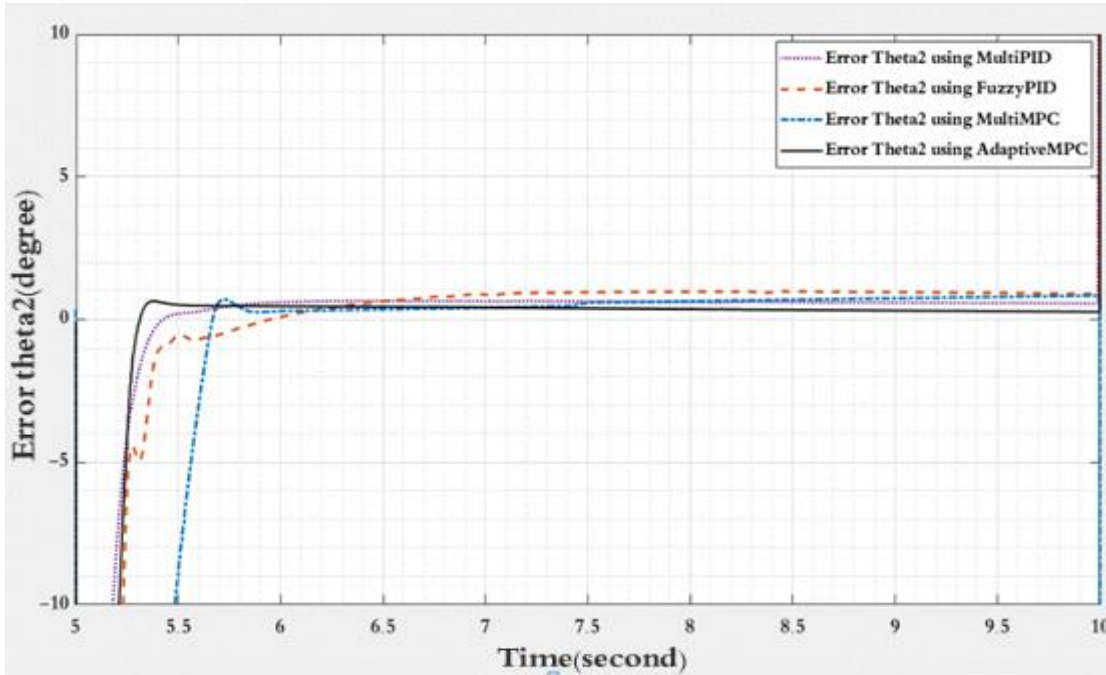
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-5: استجابة الذراع لأوامر تحكم الخوارزميات السابقة لدخل Ramp.

يُبيّن (الشكل 5-6) إشارة خطأ استجابة كلا المفصلين عند تطبيق Ramp على دخل النظام.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 5-6: إشارة خطأ الاستجابة لدخل Ramp.

✓ نلاحظ من استجابة المفصل الأول للمتحكمين (Adaptive-MPC, Multi-MPC) عند تحريكه بخط مستقيم ميله  $6^\circ/s$  ( $90^\circ \rightarrow 120^\circ$ ) عدم ظهور تجاوز ملحوظ وذلك بسبب عدم تأثره بشكل كبير بالترابط الموجود بين المفصلين (يقوم المتحكم بتقليل أثر الترابط)،

بينما نجد حدوث تجاوز في استجابة المتحكمين الآخرين والسبب هو تأثيره بوزن وحركة المفصل الثاني لأنه مثبت عليه.

✓ أما استجابة المفصل الثاني لجميع المتحكمات عند تحريكه بخط مستقيم ميله  $6^\circ/s$  ( $150^\circ \rightarrow 180^\circ$ ) لا يحدث فيها تجاوز ملحوظ وذلك لأنه لا يتأثر كثيراً بحركة المفصل الأول مقارنة بتأثر المفصل الأول به.

✓ كما نلاحظ أن المتحكم التنبئي التكيفي يُعطي أسرع استجابة لكلا المفصلين مقارنةً ببقية المتحكمات.

✓ أما بالنسبة للخطأ السكوني للاستجابة عند تطبيق إشارة Ramp يمكننا حسابه وفق مايلي: إشارة Ramp تُعطى بالعلاقة:

$$r(t) = Rtu(t) \quad (5-1)$$

حيث R هي طولية تابع Ramp وهي عدد ثابت، يكون تابع تحويل لابلاس لهذه الإشارة

$$R(s) = \frac{R}{s^2} \quad (5-2)$$

عندها فإن خطأ الحالة المستقرة يُعطى بالعلاقة

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{R}{s + sG(s)} = \frac{R}{\lim_{s \rightarrow 0} sG(s)} \end{aligned} \quad (5-3)$$

وبما أن  $G(s)$  الذي يُعبّر عن تابع تحويل الجملة (ذراع + محركين DC) من النمط الأول لأنه مضروب بحد تكاملي من المتحكم بالتالي نستطيع أن نكتب:

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) \quad (5-4)$$

وبالتالي فإن

$$e_{ss} = \frac{R}{K} \quad (5-5)$$

هذا يعني أن الخطأ السكوني لا يندم وإنما يحافظ على قيمة ثابتة عند تطبيق إشارة Ramp

وهذا ما يظهر في إشارة الخطأ عند استخدام المتحكمين PID و Fuzzy-PID.

ولكن بالنسبة للمتحكم MPC فإنه يُعالج مسألة تنظيم (Regulation) وليس مسألة ملاحقة

(tracking) لذلك فإنه يُواجه مشكلة في تصفير الخطأ السكوني عند وجود إشارة دخل متغيرة

(مثل Ramp)

يُبين لنا (جدول 5-2) خصائص استجابة كلا المفصلين عند تطبيق إشارة Ramp.

جدول 5-2: خصائص الاستجابة الزمنية للمفصلين من أجل إشارة Ramp

Controller	المفصل الأول		المفصل الثاني	
	زمن الاستقرار (s)	خطأ سكوني (°)	زمن الاستقرار (s)	خطأ سكوني (°)
Multi-PID	2.5	0.2	0.8	0.5
Fuzzy-PID	3	0.1	1.2	1
Multi-MPC	0.7	0.8	0.8	0.7
Adaptive-MPC	0.5	0.4	0.4	0.1

نُلاحظ مما سبق أنّ استجابة المتحكم Adaptive-MPC لإشارة Ramp هي الأفضل، حيث أنّ التجاوز معدوم تقريباً، وقيم زمن الاستقرار والخطأ السكوني هي الأصغر.

يتضمن الجدولين (جدول 5-3، جدول 5-4) خصائص الاستجابة في المجال الزمني للنموذج الافتراضي (المفصل 1، المفصل 2) للأوامر الصادرة عن المتحكمات التي تمّ استخدامها في هذا العمل بالنسبة لمجموعة من المواضيع المرجعية التي تمّ تطبيقها في الفصل السابق عند رسم استجابة الذراع لكل متحكم من هذه المتحكمات، وذلك استناداً لمعايير استجابة الحلقة المغلقة لدخل خطوي التي ذكرناها سابقاً.

جدول 5-3: خصائص الاستجابة الزمنية للمفصل الأول عند تطبيق مجموعة مواضع مرجعية

Theta1(degree)	Controller	Overshoot (%)	Settling time(s)	Rise time(s)	Steady State Error (degree)
160°	Multi-PID	0.3	0.6	0.28	$1.9 * 10^{-2}$
	Fuzzy-PID	0	0.67	0.26	$5.8 * 10^{-3}$
	Multi-MPC	0	0.34	0.19	0.3
	Adaptive-MPC	0	0.24	0.13	0.2
120°	Multi-PID	2.7	1.6	0.24	$2.3 * 10^{-3}$
	Fuzzy-PID	3.9	2.1	0.24	$1.4 * 10^{-2}$
	Multi-MPC	0.5	0.5	0.5	0.1
	Adaptive-MPC	0.3	0.3	0.16	0.1
85°	Multi-PID	7.6	2.01	0.17	$0.6 * 10^{-3}$
	Fuzzy-PID	6	2.7	0.173	$1.3 * 10^{-2}$
	Multi-MPC	0.2	0.48	0.27	0.8
	Adaptive-MPC	0.06	0.37	0.21	0.05
40°	Multi-PID	12	1.33	0.16	$0.5 * 10^{-2}$
	Fuzzy-PID	14	2.5	0.21	$0.2 * 10^{-1}$

5°	<b>Multi-MPC</b>	0	0.7	0.36	<b>0.4</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.6	0.38	0.22	<b>0.1</b>
	<b>Multi-PID</b>	32	1	0.14	<b>0.1 * 10<sup>-3</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	25	2.2	0.22	<b>1.6 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0.8	0.65	0.31	<b>0.5</b>
63°	<b>Adaptive-MPC</b>	0.5	0.4	0.23	<b>0.2</b>
	<b>Multi-PID</b>	8	1.89	0.21	<b>0.13 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	9	1.47	0.19	<b>6.8 * 10<sup>-3</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0	0.8	0.51	<b>0.3</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.1	0.4	0.23	<b>0.07</b>

جدول 4-5: خصائص الاستجابة الزمنية للمفصل الثاني عند مجموعة مواضع مرجعية

Theta2(degree)	Controller	Overshoot (%)	Settling time(s)	Rise time(s)	Steady State Error (degree)
195°	<b>Multi-PID</b>	0	0.39	0.28	<b>0.7 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	0	0.9	0.27	<b>0.1 * 10<sup>-1</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0	0.33	0.18	<b>0.3</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.05	0.26	0.1	<b>0.09</b>
160°	<b>Multi-PID</b>	0.6	0.46	0.24	<b>0.2 * 10<sup>-1</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	0.4	1.1	0.23	<b>1.7 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0.8	0.42	0.23	<b>0.2</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.23	0.25	0.16	<b>0.05</b>
189°	<b>Multi-PID</b>	1.3	1.23	0.17	<b>0.3 * 10<sup>-1</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	1.6	2	0.17	<b>0.7 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0	0.45	0.26	<b>0.3</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.06	0.33	0.15	<b>0.05</b>
155°	<b>Multi-PID</b>	0.2	0.47	0.16	<b>0.7 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	0	0.76	0.21	<b>0.3 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0	0.5	0.37	<b>0.1</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0	0.26	0.16	<b>0.02</b>
135°	<b>Multi-PID</b>	0.1	0.89	0.14	<b>0.1 * 10<sup>-1</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	2.7	2.15	0.15	<b>2.3 * 10<sup>-3</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	0.35	0.4	0.26	<b>0.07</b>
	<b>Adaptive-MPC</b>	0.1	0.2	0.13	<b>0.01</b>
160°	<b>Multi-PID</b>	0.9	1	0.21	<b>0.2 * 10<sup>-1</sup></b>
	<b>Fuzzy-PID</b>	1.4	2.44	0.13	<b>1.6 * 10<sup>-2</sup></b>
	<b>Multi-MPC</b>	2	0.35	0.27	<b>0.2</b>

Adaptive-MPC	0.13	0.35	0.16	0.2
--------------	------	------	------	-----

تُلاحظ من الجدولين السابقين (جدول 3-5، جدول 4-5):

✚ إنَّ أزمدة الاستقرار عند تطبيق المتحكمين Adaptive-MPC و Multi-MPC لا تتجاوز 0.7s بينما أزمدة الاستقرار باستخدام كل من Multi-PID و Fuzzy-PID قد يصل إلى 3s وبالتالي فإن المتحكمات التنبؤية أسرع استقراراً من المتحكمين الآخرين.

✚ التجاوز الذي يحصل عند تطبيق Adaptive-MPC لا يتجاوز 0.5%، وعند تطبيق Multi-MPC لا يتجاوز 2%، بينما يتجاوز 20% عند استخدام Fuzzy-PID و Multi-PID.

✚ زمن الصعود عند استخدام المتحكم التنبؤي متعدد النماذج والمتحكم التنبؤي التكيفي لا يختلف كثيراً عن زمن الصعود للمتحكمين Multi-PID و Fuzzy-PID.

✚ الخطأ السكوني عند استخدام المتحكمين Fuzzy-PID و Multi-PID من أجل زمنتنفيذ 5s لكل دخل خطوي من رتبة  $10^{-2}$ ، أي صفري تقريباً.

✚ تتراوح قيم الخطأ السكوني للمتحكم Multi-MPC على مجال العمل بين  $0.1^\circ$  و  $0.8^\circ$  وهي كبيرة نسبياً تعود هذه القيم إلى اللاخطية في الذراع، على الرغم من أنَّ هذا المتحكم في الحالة الخطية يعدم الخطأ السكوني.

✚ تتراوح قيم الخطأ السكوني للمتحكم Adaptive-MPC بين  $0^\circ$  و  $0.2^\circ$  وهذا يُبين قدرة هذا المتحكم على تصغير الخطأ السكوني بشكل جيد، وليس تصفيره.

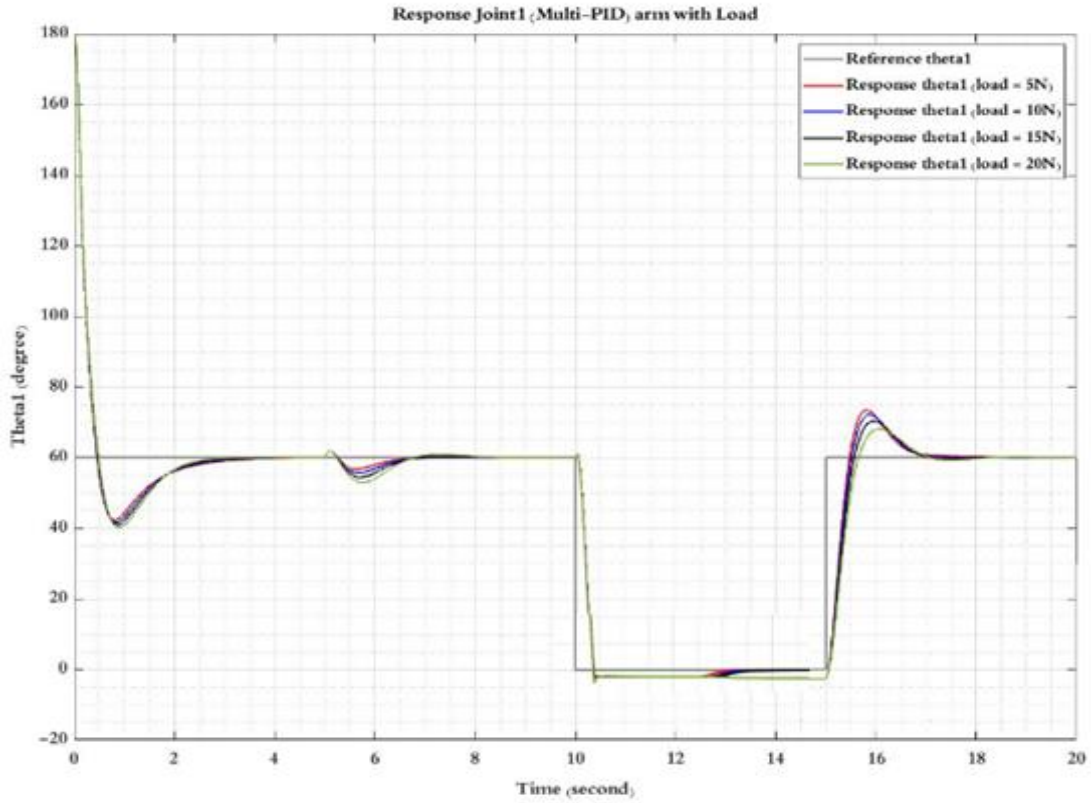
### 2.2.5. دراسة الاستجابة مع وجود حمل

إنَّ وجود حمل إضافي على نهاية الذراع يعني وجود عزم مقاوم إضافي أثناء رفع الذراع، أو عزم مساعد أثناء تنزيل الذراع، غير مأخوذين بعين الاعتبار أثناء ضبط معاملات المتحكم، وهذا يؤدي وفق المعادلة الديناميكية إلى تسارع زاوي أقل (أو أكثر) لمفاصل الذراع. إنَّ صلادة المتحكم تتمثل بقدرته على التخفيف من تأثير هذا الحمل على خصائص الاستجابة في الحلقة المغلقة.

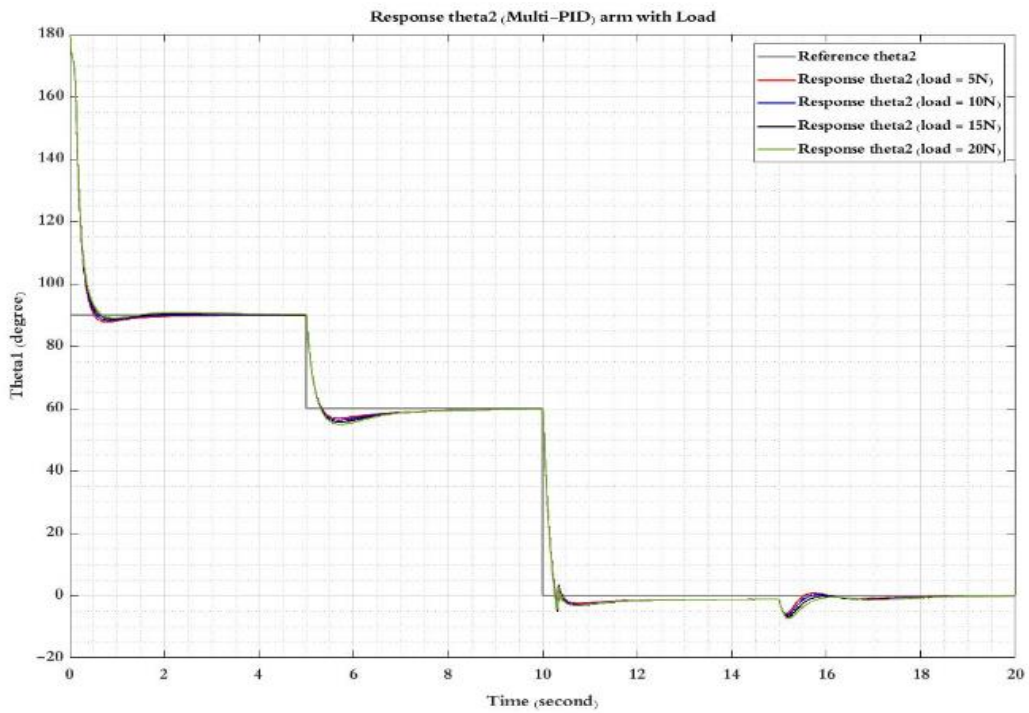
من أجل دراسة صلادة المتحكمات السابقة تمَّ إضافة حمل بقيم متزايدة على نهاية الذراع الروبوتية في بيئة ADAMS® وبقيمة عظمية تساوي 100% من وزن الذراع مع ملاحظة أثرها على استجابة الذراع لكل متحكم.

### 1.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Multi-PID

يُبين (الشكل 5-7) استجابة كلا المفصلين عند استخدام المتحكم Multi-PID السابق مع تطبيق الأحمال على نهاية الذراع الروبوتية.



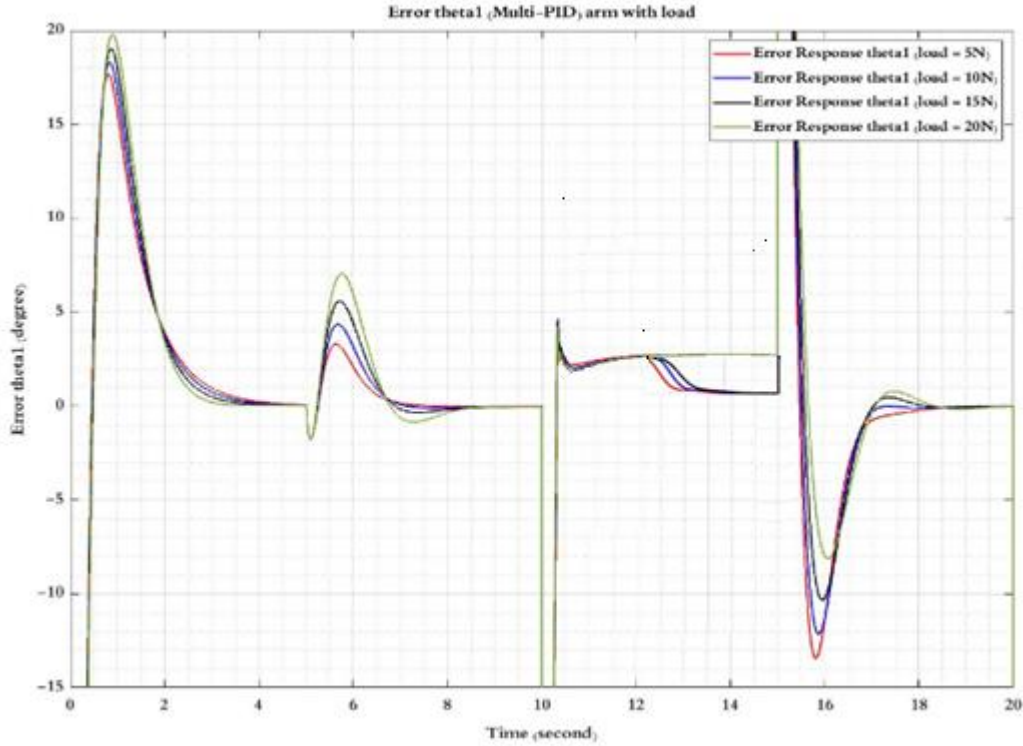
(a) المفصل الأول



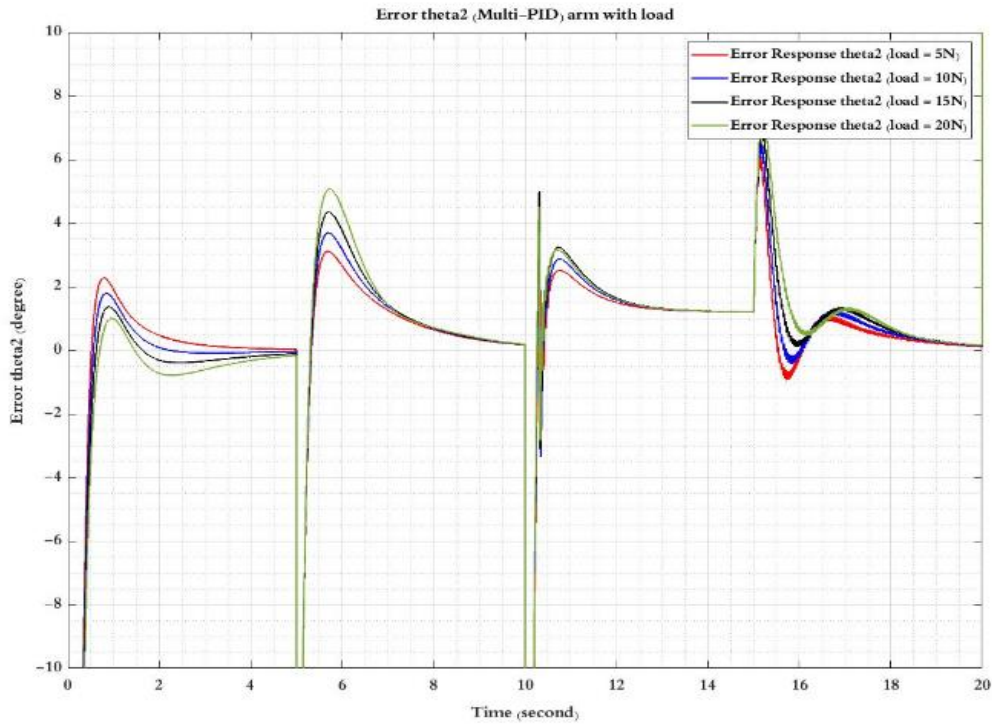
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-7: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Multi-PID)

يُبين (الشكل 5-8) إشارة خطأ الاستجابة السابقة لكلا المفصلين.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 5-8: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Multi-PID)

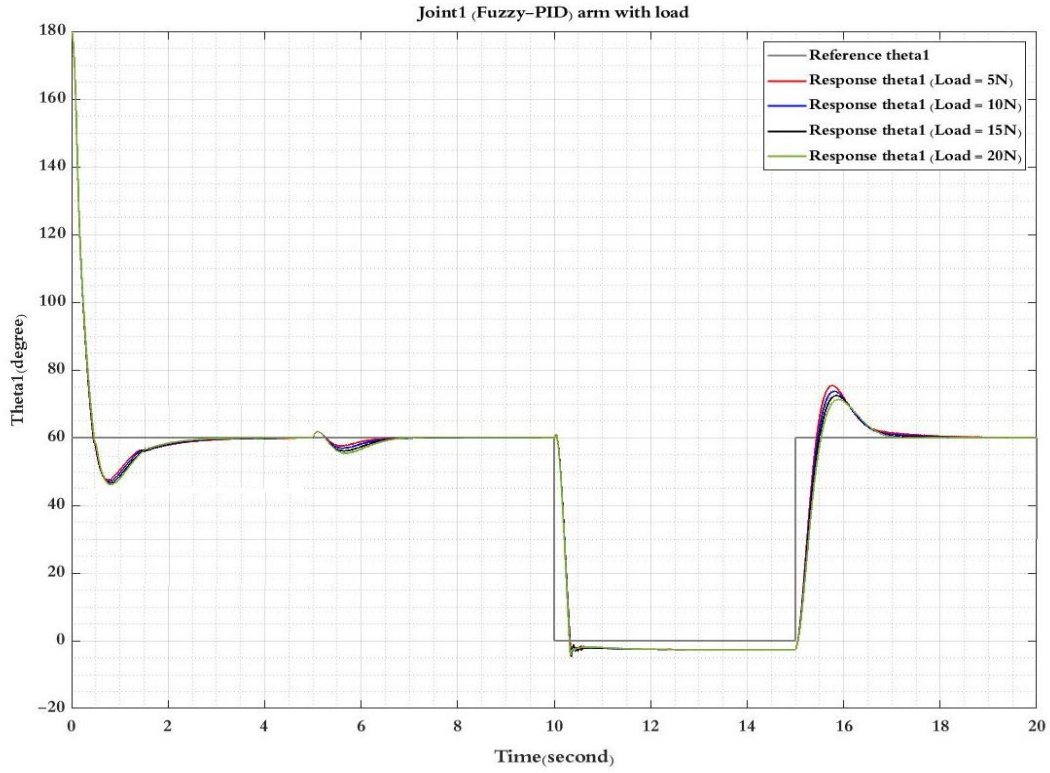
نُلاحظ من الاستجابة أنّ تأثير وجود حمل إضافي على نهاية الذراع يظهر عند استخدام المتحكم Multi-PID ، الذي يتمثل بزيادة قيمة التجاوز عندما تلعب الحمولة دور عزم مساعد عند تنزيل الذراع وخفض قيمة التجاوز عندما تلعب هذه الحمولة دور عزم مقاوم وزيادة زمن الاستقرار بشكل بسيط.

فعند وجود حمل على الذراع نلاحظ حدوث تجاوز بمقدار 18 درجة في المفصل الأول و4 درجات في المفصل الثاني عند تحريك المفصل الأول من  $180^\circ$  إلى الزاوية  $60^\circ$  وتحريك المفصل الثاني من الزاوية  $180^\circ$  إلى الزاوية  $90^\circ$ ، وعند تثبيت أحد المفاصل وتحريك المفصل الآخر نجد أن المفصل المثبت يُزاح من موضعه ثمّ يعود إليه حيثُ يقوم المتحكم بإعادة تصحيح الخطأ والسبب في هذه الإزاحة هو الترابط بين المفصلين وكما لاحظنا عند تحريك المفاصل باتجاه الموضع الصفري توقف حركة الذراع ليس بسبب حلقة التحكم المستخدمة وإنما بسبب اصطدام المفاصل بالأرض في بيئة ADAMS عندها يتدخل المتحكم لإعادة المفصل الأول إلى الموضع الصفري لكن عند تطبيق حمولة 20N أصبح المتحكم Multi-PID غير قادر على إعادة المفصل الأول للموضع المطلوب (الموضع الصفري) في اللحظة 10s إذ أنّه يتأثر إضافةً لوزنه، بوزن المفصل الثاني والحمولة المضافة (التي تمّ زيادتها تدريجياً)، أمّا بالنسبة للمفصل الثاني نلاحظ عدم قدرة المتحكم على إعادته إلى الموضع الصفري نتيجة تأثره بالوزن الذي تمّ إضافته وهذا يُبين لنا أهمية النمذجة التشاركية مع بيئة ADAMS في تمثيل البيئة المحيطة وهذا لا يُقدّمه لنا النموذج الرياضي لوحده. تزداد قيمة زمن الاستقرار في المفصل الأول بمقدار 0.2s عند زيادة وزن الحمولة المضافة.

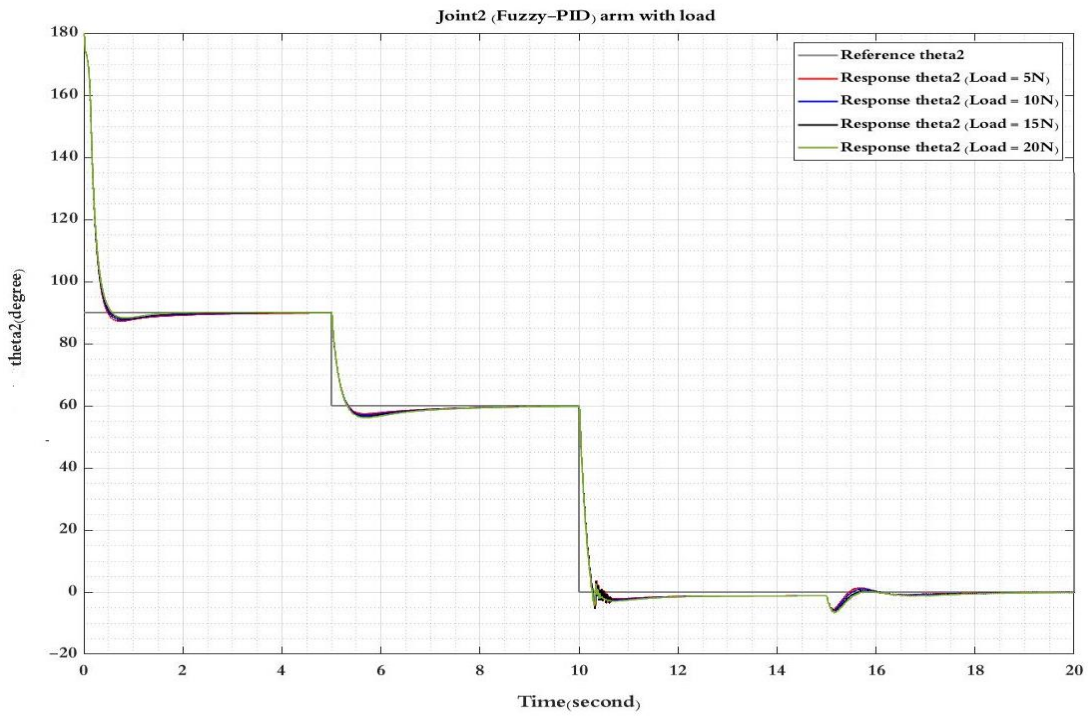
هذه النتائج متوقعة وذلك لأنّه لم يتم أخذ الحمولة بعين الاعتبار عند ضبط معاملات المتحكم Multi-PID وثبيتها لى قيم محددة.

### 2.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Fuzzy-PID

يُبين (الشكل 5-9) استجابة كلا المفصلين عند استخدام المتحكم Fuzzy-PID السابق مع تطبيق الأحمال على نهاية الذراع الروبوتية.



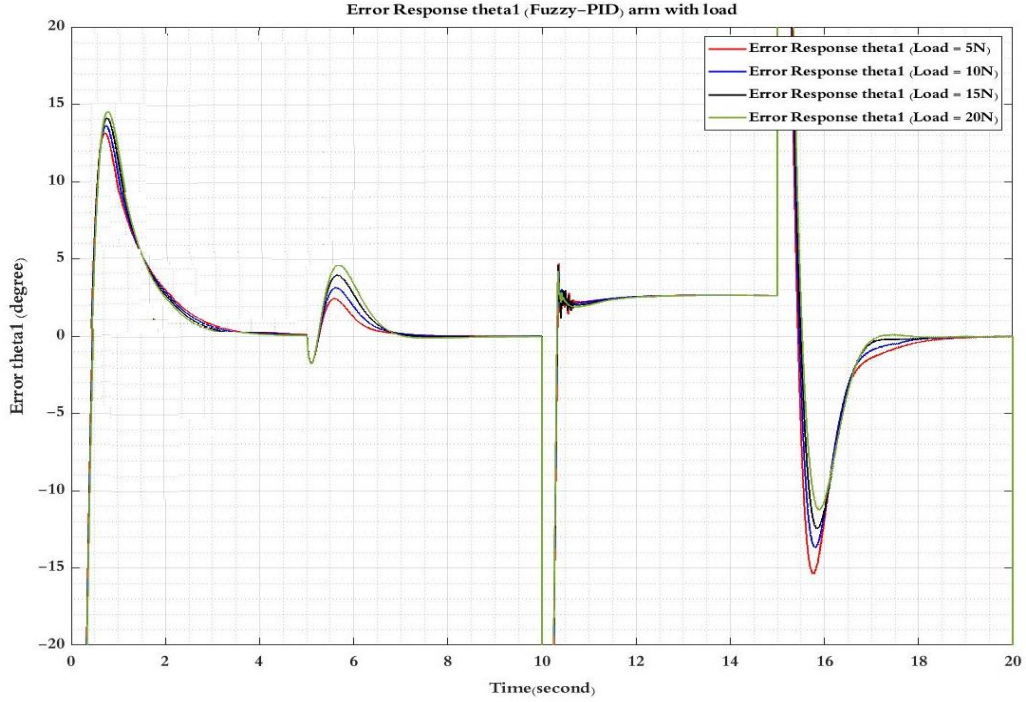
(a) المفصل الأول



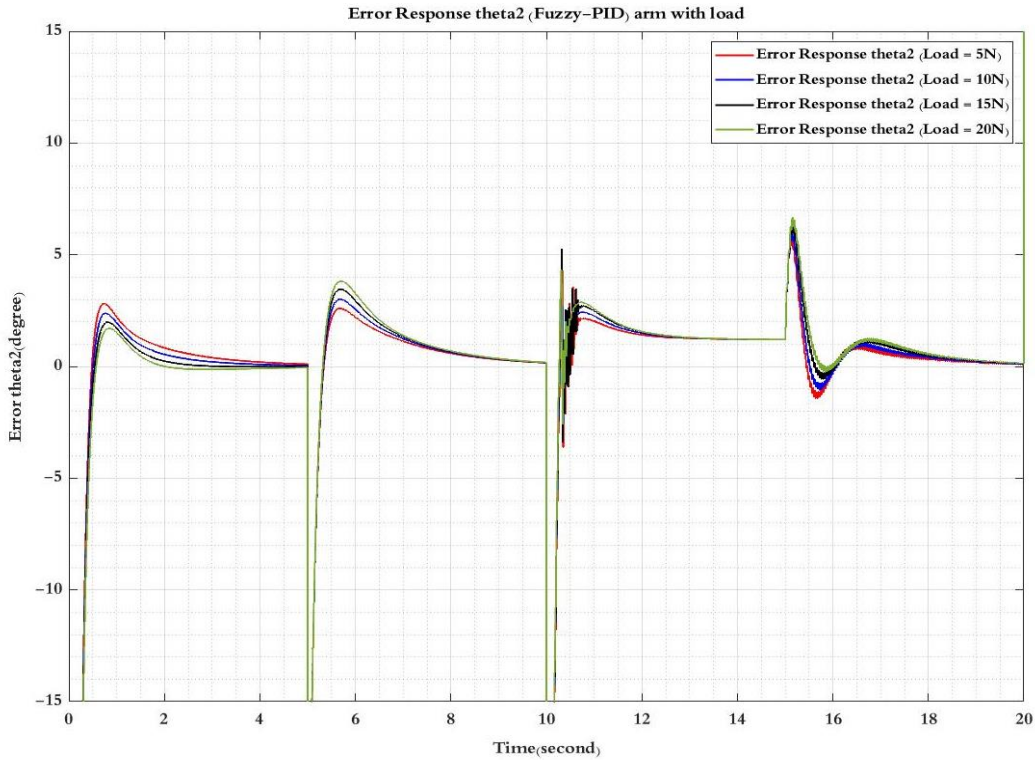
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-9: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Fuzzy-PID)

يُبين (الشكل 5-10) إشارة الخطأ الناتجة عن الاستجابة السابقة لكلا المفصلين.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 5-10: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Fuzzy-PID)

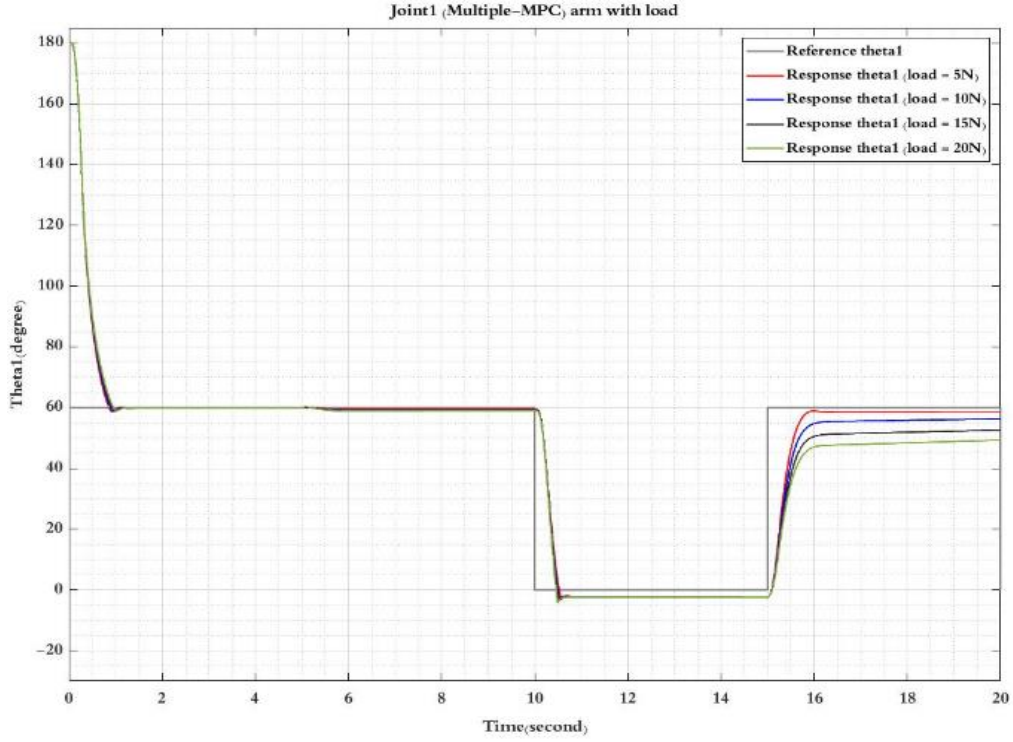
نُلاحظ من الاستجابة أنّ تأثير وجود حمل إضافي على نهاية الذراع يظهر عند استخدام المتحكم Fuzzy-PID الذي يتمثل بزيادة قيمة التجاوز عندما تلعب الحمولة دور عزم مساعد عند تنزيل الذراع وخفض قيمة التجاوز عندما تلعب هذه الحمولة دور عزم مقاوم وزيادة زمن الاستقرار بشكل بسيط.

فعند وجود حمل على الذراع نلاحظ حدوث تجاوز بمقدار 15 درجة في المفصل الأول و3 درجات في المفصل الثاني عند تحريك المفصل الأول من  $180^\circ$  إلى الزاوية  $60^\circ$  وتحريك المفصل الثاني من الزاوية  $180^\circ$  إلى الزاوية  $90^\circ$  ثمّ عودة المفاصل إلى المواضع المطلوب، وعند تثبيت أحد المفاصل وتحريك المفصل الآخر نجد أنّ المفصل المثبت يُزاح عن موضعه ثمّ يعود إليه حيث يقوم المتحكم بإعادة تصحيح الخطأ والسبب في هذه الإزاحة هو الترابط بين المفصلين وكما لاحظنا توقف حركة المفاصل عند تحريكها باتجاه الموضع الصفري وذلك ليس بسبب المتحكم وإنما بسبب اصطدامهما بالأرض في بيئة ADAMS، كما وجدنا حدوث خطأ باستجابة كلا المفصلين عند تحريكهما من موضع إلى آخر وبالتالي فهو غير قادر على إعطاء استجابة مقبولة عند إضافة حمل خارجي والذي لم يُؤخذ بعين الاعتبار عند تصميمه، على الرغم من أنّه يعد من المتحكمات التكيفية إذ أنّه يتحكم بقيم معاملات المتحكم PID حسب الخطأ ومعدل تغييره ولكنّ هذه المعاملات محدودة المجال بين قيم أعظمية وقيم أصغرية أي لا بدّ من تغييرها مع الأخذ بعين الاعتبار وجود حمل وسطي لكي تتحسن الاستجابة. تزداد قيمة زمن الاستقرار في المفصل الأول بمقدار 0.2s عند زيادة وزن الحمولة المضافة.

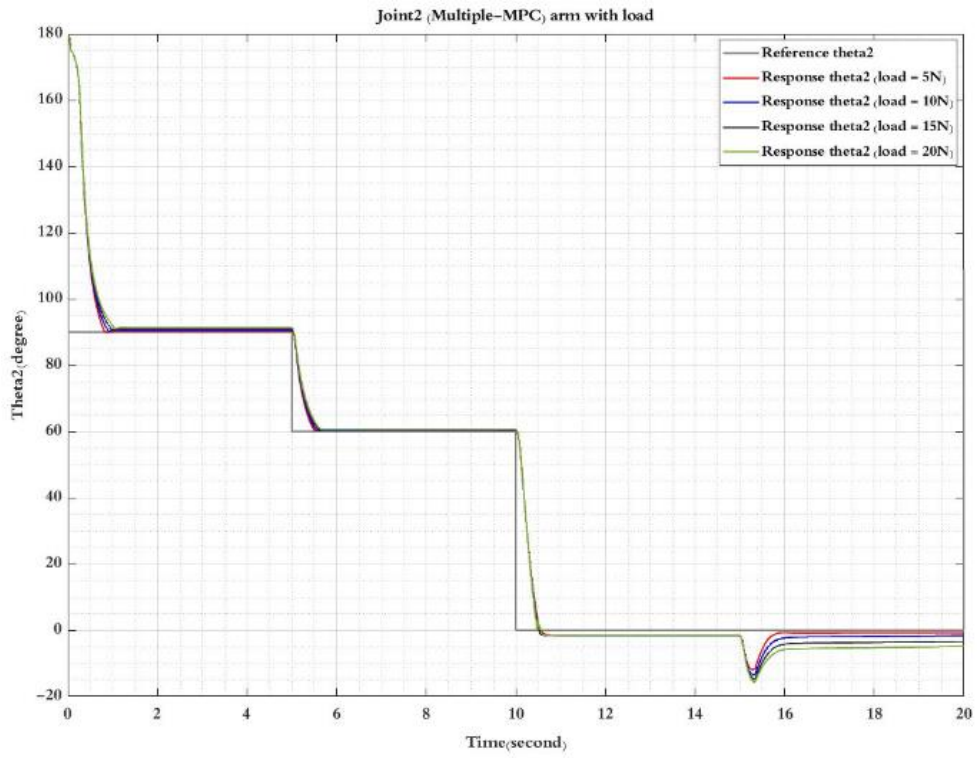
وبالتالي فإنّ هذا المتحكم أيضاً غير صلد عند إضافة أحمال خارجية دون أخذها بعين الاعتبار عند تصميمه

### 3.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Multi-MPC

يبين (الشكل 5-11) استجابة كلا المفصلين عند استخدام المتحكم Multi-MPC السابق مع تطبيق الأحمال على نهاية الذراع الروبوتية.



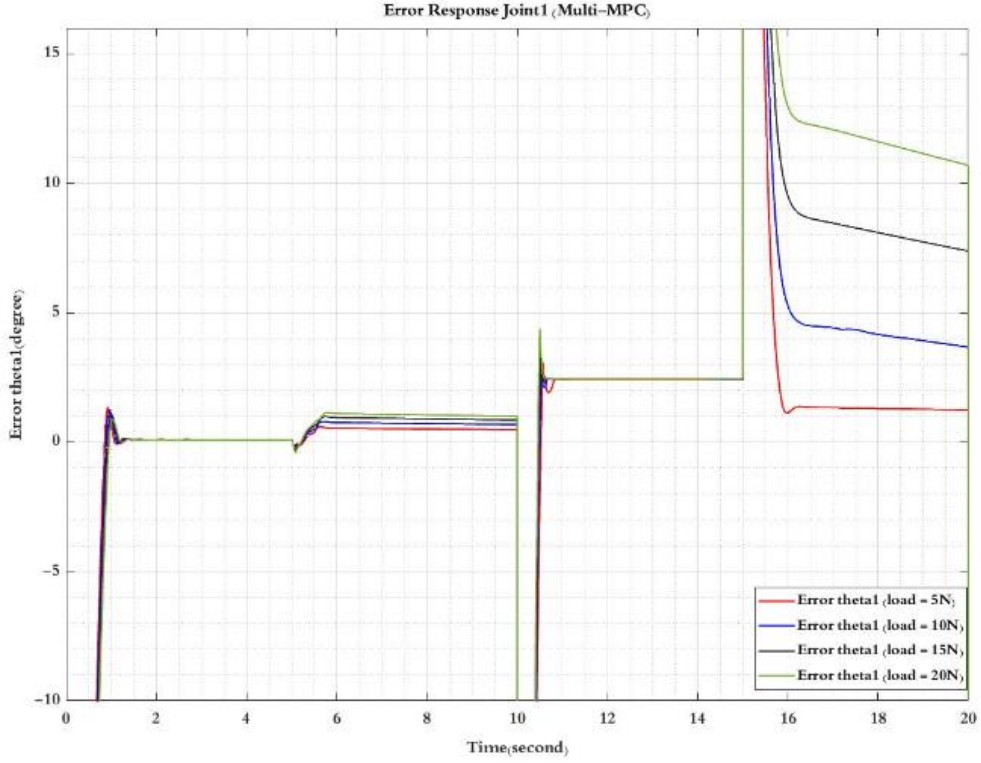
(a) المفصل الأول



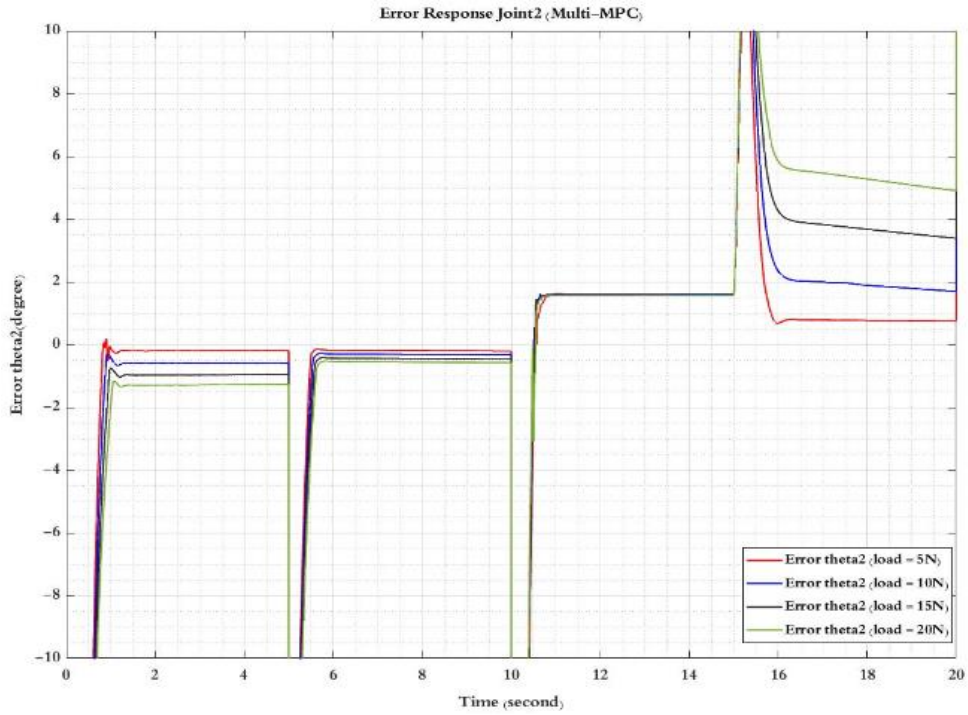
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-11: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Multi-MPC)

يُبيّن (الشكل 5-12) إشارة الخطأ الناتجة عن الاستجابة السابقة لكلا المفصلين.



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 5-12: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Multi-MPC)

نُلاحظ أنه عند تحريك المفصل الأول باتجاه الزاوية  $60^\circ$  والمفصل الثاني باتجاه الزاوية  $100^\circ$  فإن استجابة المفصل الأول لا تتأثر كثيراً بالمفصل الثاني ولا بالحمولة المضافة في نهاية الذراع ويحدث انزياح لزاوية المفصل الأول بمقدار  $1.5^\circ$  ثم تعود للموضع المطلوب بخطاً صفري بينما المفصل الثاني فيتأثر بالحمل ويزاح عن الموضع المطلوب عند تطبيق  $20N$  بمقدار  $1.5^\circ$  ويستقر عند هذه الازاحة.

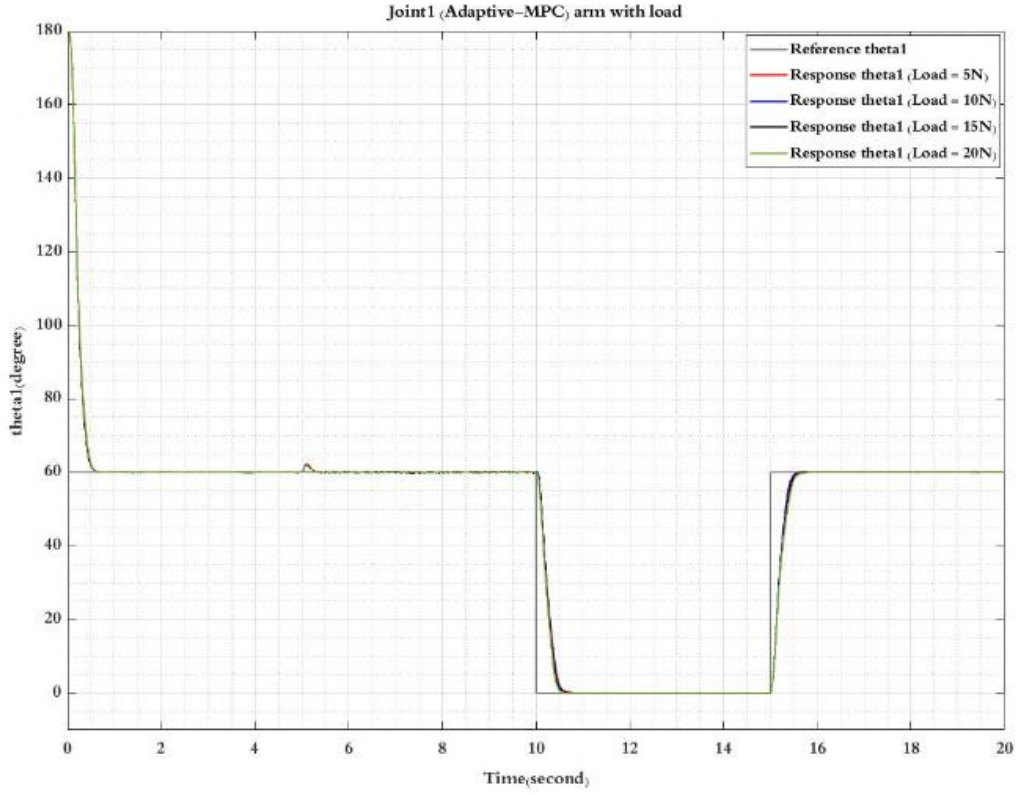
ولكن عند تثبيت المفصل الأول عند الزاوية  $60^\circ$  وتحريك المفصل الثاني باتجاه الزاوية  $60^\circ$  فإن موضع المفصل الثاني يؤثر على المفصل الأول ويسبب انزياحه عن الموضع المطلوب بمقدار  $1.2^\circ$  ويستقر عنده بخطاً غير صفري، أي أنّ هذا الموضع للمفصل الثاني والحمل يؤثر على المفصل الأول ويسبب إزاحته عن الموضع المطلوب حيث يكون تأثير الجاذبية على المفصل أكبر من الوضع الأول.

وعند تحريك كلا المفصلين باتجاه الزاوية  $0^\circ$  فإن كلا المفصلين يتأثر بالحمولة ويحدث انزياح عن الموضع المطلوب بمقدار  $2^\circ$  تقريباً وذلك نتيجة تأثرهما بالجاذبية الأرضية، وكما أنه عند تثبيت المفصل الثاني على الزاوية  $0^\circ$  وتحريك المفصل الأول باتجاه الزاوية  $60^\circ$  فإن المفصل الأول يتأثر كثيراً بالحمولة ووزن المفصل الثاني فينزاح عن الموضع المطلوب بمقدار  $12^\circ$  وأيضاً المفصل الثاني يتأثر وينزاح عن الموضع الصفري بمقدار  $6^\circ$  تقريباً. وبالتالي نستنتج أنّ هناك بعض المواضع لا يتأثر المفصلين فيها بوجود الحمولة لأن تأثير الجزء اللاخطي يكون غير كبير وبعضها الآخر يتأثر كلا المفصلين كثيراً بالحمولة وذلك بسبب التأثير الكبير للجزء اللاخطي عندها.

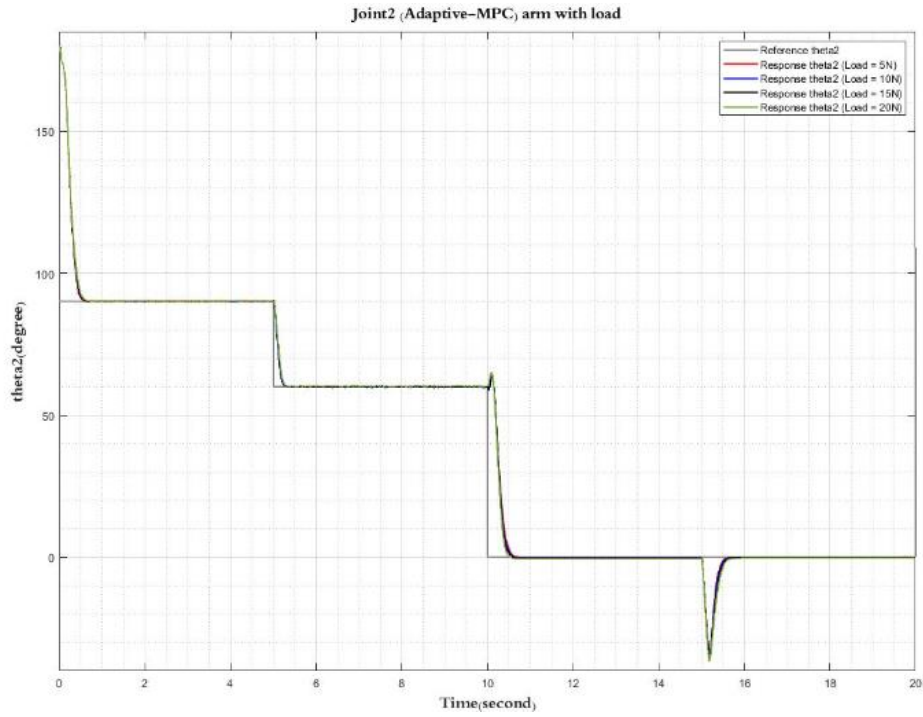
كما أنه كلما زادت الحمولة المطبقة يزيد خطأ الاستجابة عند المواضع التي تتأثر بالجزء اللاخطي للجملة، وبالتالي فإنّ هذا المتحكم غير صلد لأي تغير خارجي يطرأ على الذراع فهو لا يستطيع التغلب على التغيرات الخارجية لأنّ تصميم هذا المتحكم يقوم على إيجاد النماذج الخطية للنظام عند نقاط عمل محددة دون الأخذ بعين الاعتبار وجود أي حمل خارجي.

#### 4.2.2.5. إشارة دخل خطوية مع وجود حمل باستخدام المتحكم Adaptive-MPC

يُبين (الشكل 5-13) استجابة كلا المفصلين عند استخدام المتحكم Adaptive-MPC السابق مع تطبيق الأحمال على نهاية الذراع الروبوتية.



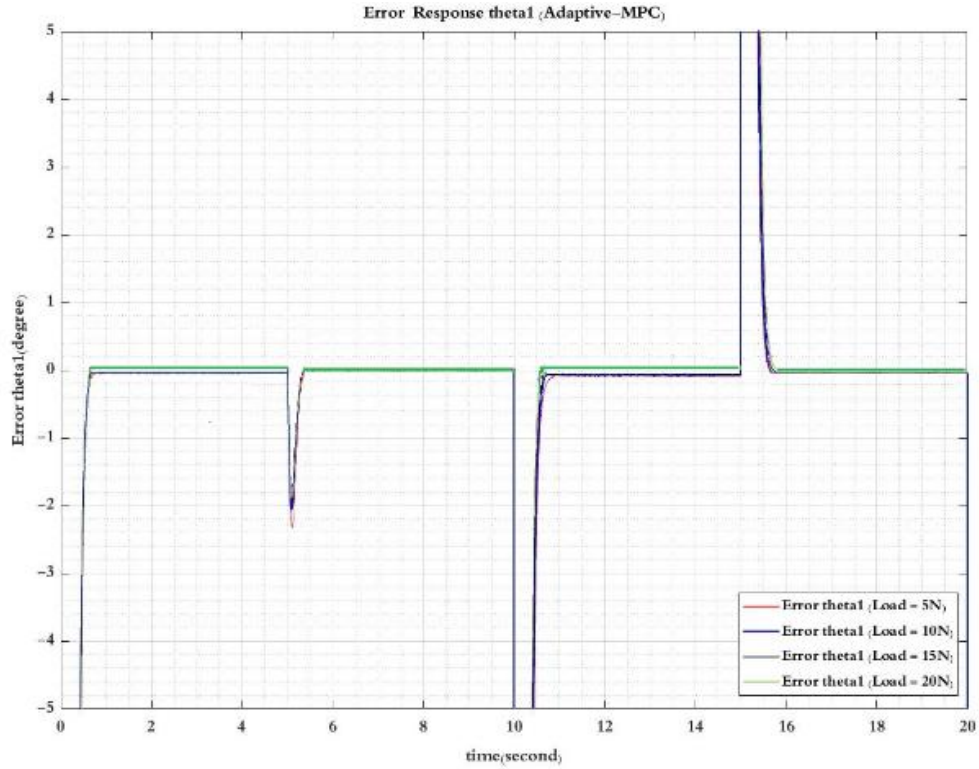
(a) المفصل الأول



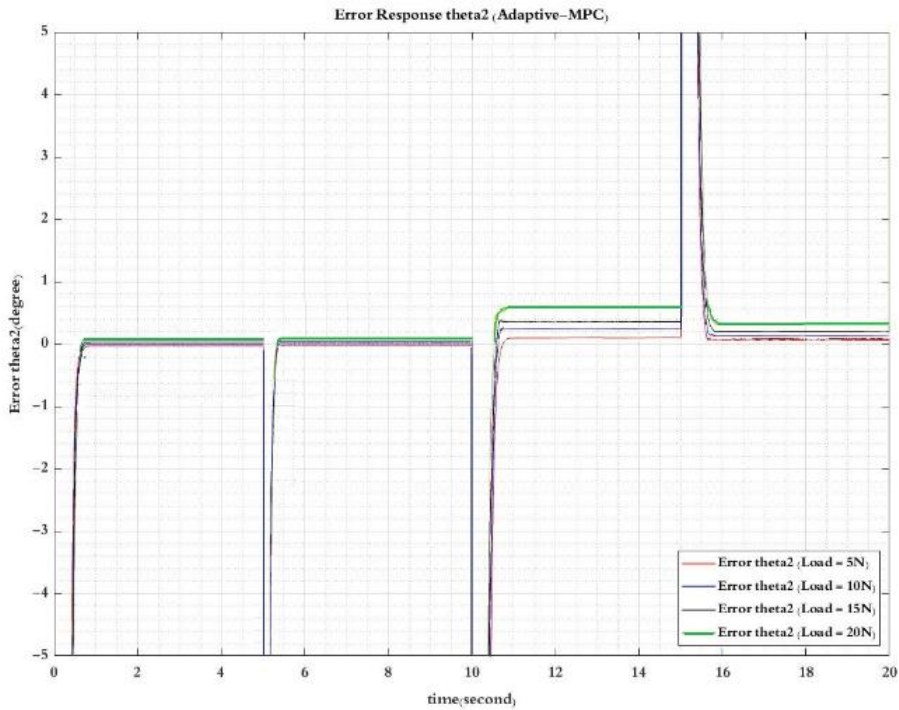
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-13: استجابة المفصلين عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Adaptive-MPC)

يُبيّن (الشكل 5-14) إشارة الخطأ الناتجة عن الاستجابة السابقة لكلا المفصلين.



(a) المفصل الأول



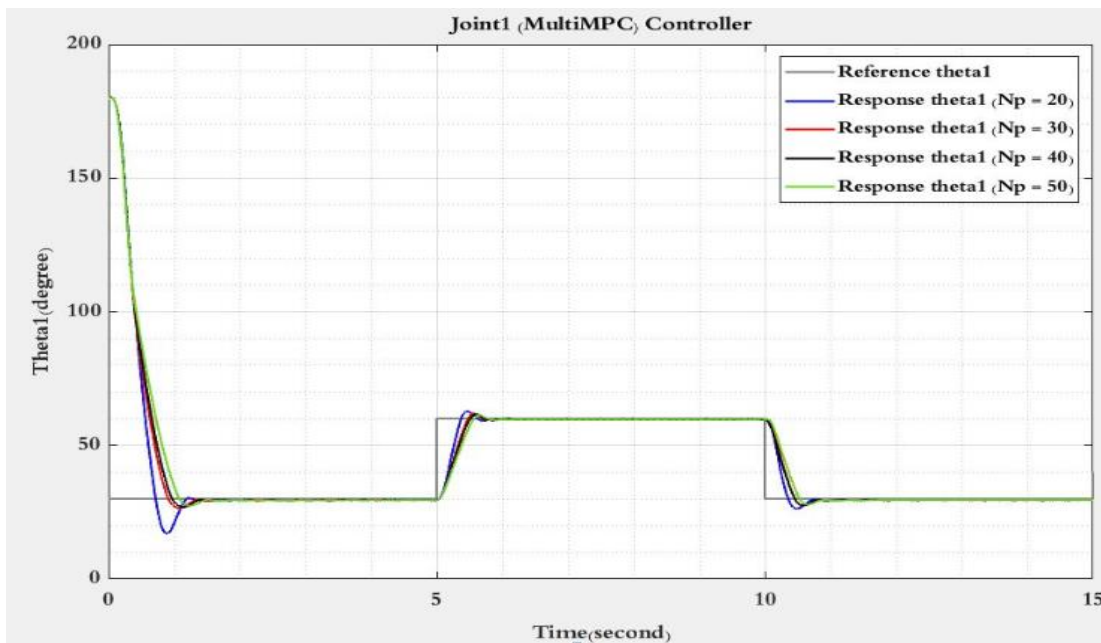
(b) المفصل الثاني

الشكل 5-14: إشارة الخطأ عند تطبيق عدة أحمال (المتحكم Adaptive-MPC)

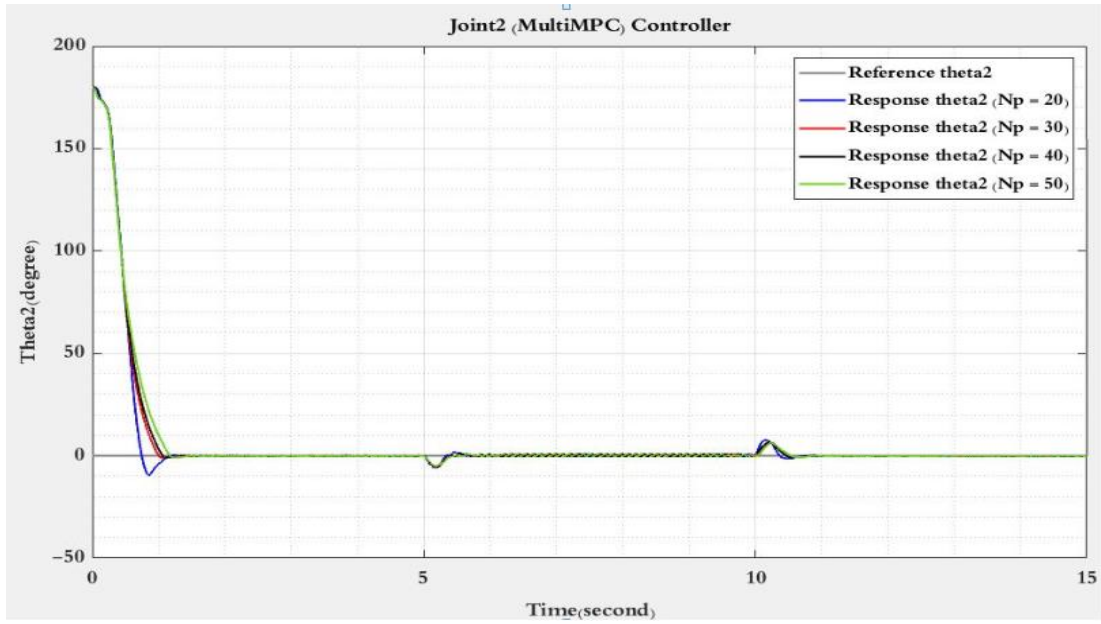
نُلاحظ أنّ استجابة هذا المتحكم مقبولة حيث أنّ الخطأ الناتج عن تطبيق الأحمال السابقة من رتبة  $0.5^\circ$  عند تطبيق 20N بالنسبة لكلا المفصلين وبالتالي فهو لا يتأثر بشكل كبير عند تطبيق حمولة تساوي 100% من وزن الذراع على الرغم من عدم أخذ الحمل بعين الاعتبار في الموديل الرياضي للجملة، لذا نستنتج أنّه صلد للتأثيرات الخارجية إلى حدٍ ما. كما نلاحظ عند تثبيت المفصل الثاني على الموضع الصفري وتحريك المفصل الأول باتجاه الزاوية  $60^\circ$  انزياح المفصل الثاني عن الموضع الصفري والسبب في ذلك هو الترابط بين المفصلين من ثمّ يقوم المتحكم بتصحيح الخطأ بعد 0.5s.

### 3.5. أثر أفق التنبؤ على الاستجابة

ذكرنا سابقاً بأنّ أفق التنبؤ يُعطي فكرة عن المجال الذي ينفذ ضمنه المتحكم حساباته الأمثلية، لذلك قمنا باختبار المتحكم عند عدة قيم لأفق التحكم فحصلنا على الاستجابات الموضّحة (الشكل 5-15، الشكل 5-16).

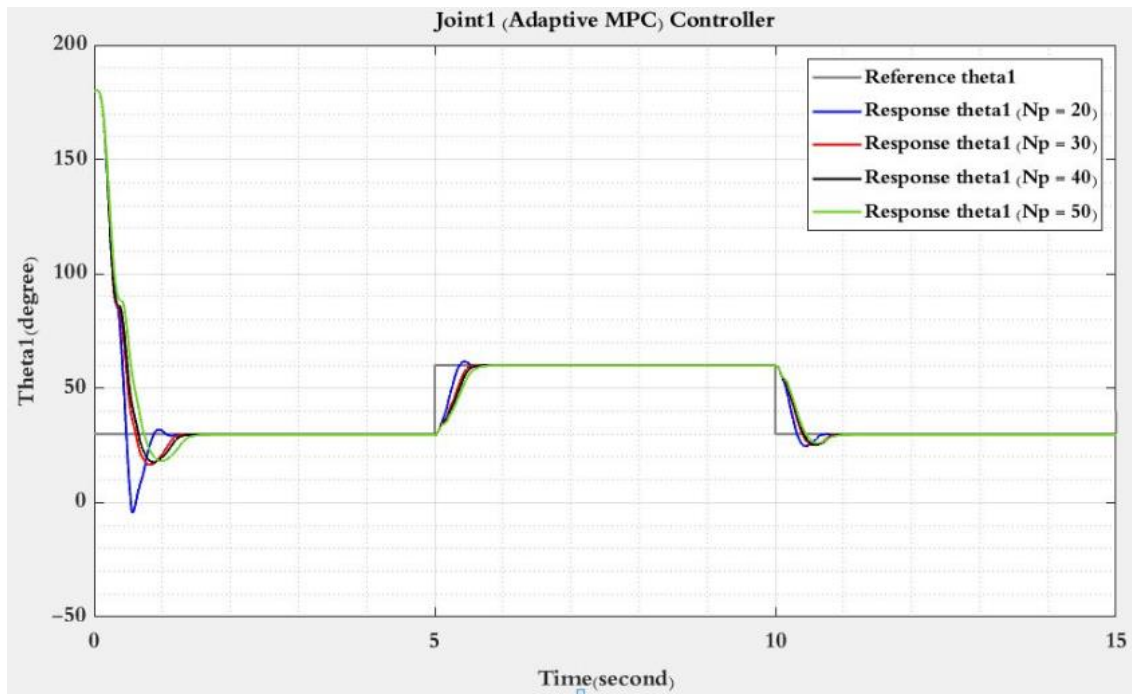


(a) المفصل الأول

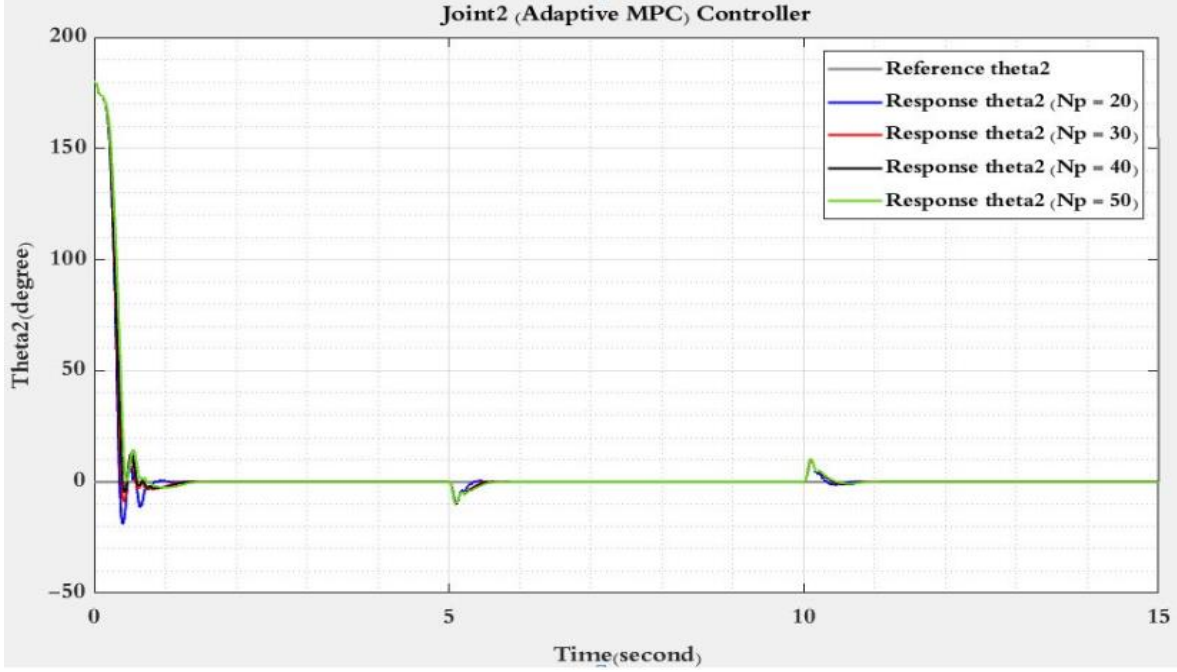


(b) المفصل الثاني

الشكل 5-15: أثر أفق التنبؤ على استجابة كلا المفصلين للمتحكم Multi-MPC



(a) المفصل الأول



(b) المفصل الثاني

الشكل 5-16: تأثير أفق التنبؤ على استجابة كلا المفصلين للمتحكم Adaptive-MPC  
 نلاحظ من الاستجابة السابقة أن القيم الصغيرة لأفق التنبؤ  $N = 20$  تُسبب حدوث تجاوز أو اهتزاز في الاستجابة لأن المتحكم غير قادر في الحصول على معلومات كافية لحساب دخل التنبؤ الأمثل وبالتالي فإن قيمة تابع الكلفة الذي يتم حسابه بالاعتماد على طول أفق التنبؤ ليست أصغر قيمة ممكنة له والذي يعطى وفق العلاقة [41]:

$$J = \sum_{i=1}^N \|W_y(r_{k+i} - y_{k+i})\|_2^2 + \sum_{i=1}^N W_u \|\Delta u_{k+i}\|_2^2$$

فعندها إذا كان طول أفق التنبؤ غير كافٍ لحساب أصغر قيمة ممكنة لتابع الكلفة فلن نحصل على دخل التنبؤ الأمثل وبالتالي ستظهر مشاكل في استجابة الجملة وعند زيادة قيمة أفق التنبؤ عن حد معين نجد أن تأثيره على الاستجابة بسيط جداً. وعندها فإن القيم الكبيرة لأفق التنبؤ ليست ذات تأثير مهم على استجابة النظام وإنما فقط تزيد من تعقيد الحسابات وهذا موضَّح في الجدول التالي الذي يُبين أزمنة التنفيذ على بطاقة R-Pi.

Prediction Horizon(Np)	Maximum Execution Time (ms)	
	Adaptive-MPC	Multiple-MPC
20	9.6	1.7
30	21.97	3
40	23.68	3.5
50	35.12	4.9

## 4.5. أزمنة تنفيذ الخوارزميات باستخدام المحاكاة PII

عند تطبيق الخوارزميات السابقة باستخدام المحاكاة PII التي ذكرناها سابقاً بهدف ترجمة هذه الخوارزميات آلياً وتصديرها إلى البطاقات الحاسوبية وتنفيذها ضمن بيئة Simulink من أجل دراسة أزمنة التنفيذ وصحة الحسابات المنفذة على هذه البطاقات. يوضّح (جدول 5-5، جدول 6-5) أزمنة تشغيل خوارزميتي Mutli-PID و Fuzzy-PID على بطاقة أردوينو:

جدول 5-5: زمن تشغيل خوارزمية Multi-PID على بطاقة A-Due

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Multi-PID- Arduino initialize</a>	1459	1459	1
<a href="#">Multi-PID- Arduino Step[0.005]</a>	103697	6899	3001
<a href="#">Multi-PID- Arduino terminate</a>	2291	2291	1

جدول 6-5: زمن تشغيل خوارزمية Fuzzy-PID على بطاقة A-Due

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Fuzzy-PID-Arduino Due initialize</a>	6000	6000	1
<a href="#">Fuzzy-PID- Arduino Due Step[0.005]</a>	227290000	226818686	3001
<a href="#">Fuzzy-PID- Arduino Due terminate</a>	2000	2000	1

تُبين الجداول التالية أزمنة تشغيل الخوارزميات السابقة عند تنفيذها على بطاقة R-PI

- يُوضّح (جدول 7-5) أزمنة تشغيل خوارزمية Multi-PID باستخدام المحاكاة السابقة.

جدول 7-5: زمن تشغيل خوارزمية Multi-PID على بطاقة Raspberry-PI

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Multi-PID-Raspberry-Pi-initialize</a>	5312	5312	1
<a href="#">Multi-PID-Raspberry-Pi-Step[0.01]</a>	80520	4034	3001
<a href="#">Multi-PID- Raspberry-Pi-terminate</a>	625	625	1

- يُوضّح (جدول 8-5) أزمنة تشغيل خوارزمية Fuzzy-PID باستخدام المحاكاة السابقة.

جدول 5-8: زمن تشغيل خوارزمية Fuzzy-PID على بطاقة Raspberry-PI

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Fuzzy-PID-Raspberry-Pi-initialize</a>	3906	3906	1
<a href="#">Fuzzy-PID-Raspberry-Pi-Step[0.01]</a>	7147812	2748688	3001
<a href="#">Fuzzy-PID- Raspberry-Pi -terminate</a>	781	781	1

• يُوضّح (جدول 5-9) أزمنة تشغيل خوارزمية Multi-MPC باستخدام المحاكاة السابقة.

جدول 5-9: زمن تشغيل خوارزمية Multi-MPC على بطاقة Raspberry-PI

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Multi-MPC-Raspberry-Pi-initialize</a>	17760	17760	1
<a href="#">Multi-MPC-Raspberry-Pi-Step[0.01]</a>	4704948	1446890	3001
<a href="#">Multi-MPC- Raspberry-Pi -terminate</a>	1041	1041	1

• يُوضّح (جدول 5-10) أزمنة تشغيل خوارزمية Adaptive-MPC باستخدام المحاكاة السابقة.

جدول 5-10: زمن تشغيل خوارزمية Adaptive-MPC على بطاقة Raspberry-PI

Section	Maximum Execution Time (ns)	Average Execution Time (ns)	Calls
<a href="#">Adaptive-MPC-Raspberry-Pi-initialize</a>	8229	8229	1
<a href="#">Adaptive-MPC-Raspberry-Pi-Step[0.01]</a>	20688958	18362722	3001
<a href="#">Adaptive-MPC- Raspberry-Pi -terminate</a>	573	573	1

- ✚ عند المقارنة بين خوارزميتي Multi-PID و Fuzzy-PID على بطاقة أردوينو:
- إنَّ زمن التنفيذ الأعظمي لخوارزمية Multi-PID على هذه البطاقة يقارب  $104\mu s$ ، وبالتالي فإنَّ تردد العمل يتجاوز  $10KHz$  وهو تردد عمل مرتفع جداً.
  - إنَّ زمن التنفيذ الأعظمي لخوارزمية Fuzzy-PID على هذه البطاقة يقارب  $227ms$  وبالتالي فإنَّ تردد العمل لهذه الخوارزمية لا يتجاوز  $4Hz$ .
- ✚ عند المقارنة بين الخوارزميات السابقة من حيث زمن التشغيل تبين لنا ما يلي:
- أنَّ خوارزمية Multi-PID تتطلب زمن تنفيذ أعظمي على بطاقة الراسبيري باي يقارب  $81\mu s$ ، وبالتالي فإنَّ التردد الأعظمي المطلوب لعملها يتجاوز  $10KHz$  وهو تردد عمل مرتفع (جدول 5-7).

- خوارزمية Fuzzy-PID تتطلب زمن تنفيذ أعظمي على نفس البطاقة يقارب 7ms، وبالتالي فإن التردد الأعظمي المطلوب لعملها يتجاوز 100Hz (جدول 5-8).
  - خوارزمية Multi-MPC تتطلب زمن تنفيذ أعظمي على البطاقة يقارب 5ms، وبالتالي فإن التردد الأعظمي المطلوب لعملها 200Hz (جدول 5-9).
  - خوارزمية Adaptive-MPC تتطلب زمن تنفيذ 20ms وبالتالي فإن التردد الأعظمي المطلوب لعملها على البطاقة هو 50Hz (جدول 5-10).
- يُوضَّح (جدول 5-11) التالي تردد العمل الأعظمي لكل خوارزمية:

جدول 5-11: تردد العمل الأعظمي للخوارزميات المطبقة على البطاقات الحاسوبية

بطاقة R-PI	بطاقة A-Due	المتحكم
10KHz	10KHz	<b>Multi-PID</b>
100Hz	4Hz	<b>Fuzzy-PID</b>
200Hz	-	<b>Multi-MPC</b>
50Hz	-	<b>Adaptive-MPC</b>

## 5.5. الخلاصة

تم في هذا الفصل دراسة أداء المتحكمات التي تم تصميمها في الفصل الرابع على الذراع الروبوتية من خلال تطبيق إشارات خطوية و Ramp واستنتاج خصائص الاستجابة لكل مفصل بالاعتماد على معايير الاستجابة للحلقة المغلقة في المجال الزمني للمقارنة بينها، كما تم دراسة أثر إضافة حمل في نهاية الذراع على استجابة جميع المتحكمات لاستنتاج المتحكم الأكثر صلابة للتغيرات التي تطرأ على النظام ولا تؤخذ بعين الاعتبار عند تصميم المتحكمات.

بالإضافة إلى دراسة أثر أفق التنبؤ على استجابة الجملة لكلا المتحكمين (Multi MPC, Adaptive MPC)، وعلى زيادة تعقيد الخوارزمية (زيادة زمن التنفيذ على البطاقات الحاسوبية). وأيضاً تم إيجاد أزمنة تنفيذ المتحكمات على البطاقات الحاسوبية وتردد العمل الأعظمي لكل منها.

# الفصل السادس

---

6. الخاتمة والآفاق المستقبلية

---

## 1.6. الخاتمة

يتمثل الهدف الرئيسي من البحث المنجز بتطبيق عدد من خوارزميات التحكم الشهيرة والمقارنة بينها للتحكم بموضع ذراع روبوت هجين ذي درجتي حرية، وذلك بالاستفادة من النمذجة التشاركية التي ساعدتنا على الربط بين النموذج الافتراضي للذراع الذي تم بناؤه في بيئة ADAMS® وخوارزميات التحكم التي تم بناؤها في بيئة Matlab-Simulink® بالإضافة إلى اختبار تنفيذ هذه الخوارزميات عملياً على الحواسيب المصغرة (Raspberry-Pi) عن طريق الاستفادة من تقنية المحاكاة PIL التي يقدمها MATLAB والتي تتيح لنا عملية الترجمة الآلية لهذه الخوارزميات للمقارنة بينها من حيث أزمنة التنفيذ وتقييم قدرة هذه الحواسيب على تنفيذ الخوارزميات من خلال تطابق أدائها على البطاقة مع أدائها في بيئة Simulink.

يُمكن تلخيص إجراءات ونتائج البحث بالنقاط التالية:

- تم بدايةً إجراء دراسة مرجعية لعدد من خوارزميات التحكم الشهيرة.
- قمنا بتطبيق عدد من خوارزميات التحكم على ذراع الروبوت Multi-PID، Adaptive-MPC و Multi-MPC، Fuzzy-PID
- قمنا ببناء النموذج الديناميكي لذراع الروبوت باستخدام طريقة (أولر-لاغرانج)، كي نستفيد من ذلك فيما بعد في تصميم خوارزمية التحكم التنبئي MPC التي تعتمد على نموذج رياضي للنظام لكي يتمكن من التنبؤ بسلوك الجملة في اللحظات المستقبلية.
- قمنا بتطبيق خوارزمية MPC التي تم تصميمها بالاعتماد على المعادلات الديناميكية للنظام على النموذج الافتراضي للذراع.
- تم دراسة أثر أفق التنبؤ على استجابة خوارزميتي Multi-MPC و Adaptive-MPC.
- تم ترجمة وتصدير جميع الخوارزميات إلى بطاقتي (راسبيري باي، وأردوينو) آلياً باستخدام تقنية PIL وتنفيذها ضمن بيئة Simulink من أجل دراسة أزمنة التنفيذ وصحة الحسابات المنفذة على البطاقة.
- قمنا بدراسة تأثير وجود حمل على الذراع على أداء واستقرار هذه الخوارزميات.

## 2.6. الأفاق المستقبلية

يعد هذا البحث انطلاقة جيدة للاستفادة من تقنية المحاكاة PIL التي يوفرها لنا برنامج ماتلاب، والتي بدورها تتيح لنا عملية الترجمة الآلية لخوارزميات التحكم المختلفة على اختلاف درجة تعقيدها بالإضافة إلى تحميلها وتنفيذها على الحواسيب المصغرة في نظام التحكم النهائي المحمول.

نورد فيما يلي مجموعة من المقترحات لتطوير هذا البحث:

- تحميل المتحكم Adaptive-MPC على بطاقة الراسبري باي وتنفيذها على الذراع الحقيقية بشكل مستقل عن الحاسب.
- دراسة طرائق تحكم لخطية مختلفة أخرى كالتحكم بالأنماط المنزلة ومقارنة أدائها مع الطرق التي تمّ دراستها في هذا البحث لاختيار الطريقة الأنسب.
- دراسة إمكانية إدخال تعديل على بنية المتحكم MPC تمكنه من ملاحقة إشارة دخل خطية بشكل أفضل.
- تسريع عمل متحكم MPC وذلك باستخدام طرق مختلفة (مثل Explicit MPC....).

- [1] HolMBAD, L. and OSTERGAARD, I. Control of a cement kiln by fuzzy logic. *Fuzzy Information and Decision-Processes*, Amsterdam, North-Holland, 1982, 389-399.
- [2] Dr. David Corrigan. Characterising the response of a closed loop system, *Electronic and Electrical Engineering*, November 24, 2012.
- [3] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka and S. Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling PID Controller," *IEEE Transactions on Systems, Man., Cybernetics Society*, Vol. 23, No. 5, pp.1392–1398, Sep/Oct. 1993.
- [4] X. Wang, X. Chen, W. Jia, Y. Sun and H. Pu, "Forward Kinematics Analysis and 3-Dimensional Gait Simulation of a MiniQuad Walking Robot," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1932–1937, Aug. 2007.
- [5] S. Annand, *Software for Control and Dynamic Simulation of Unimate Puma 560 Robot*, MS Thesis, The Faculty of the College of Engineering and Technology, Ohio University, June 1993.
- [6] S. Elgazzar, "Efficient Kinematic Transformations for the Puma 560 Robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation.*, Vol. 1, No. 3, pp. 142–151, 1985.
- [7] A.C. Soh, E.A. Alwi, R.Z. Abdul Rahman and L.H. Fey, "Effect of Fuzzy Logic Controller Implementation on a Digitally Controlled Robot Movement," *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology.*, Vol. I, No. V, pp 28–39, Sep. 2008.
- [8] G.M. Khoury, M. Saad, H.Y. Kanaan and C. Asmar, "Fuzzy PID Control of a Five DOF Robot Arm," *Journal of Intelligent and Robotic systems.*, Vol. 40, No.3, pp.299–320, 2004.
- [9] S.G. Anavatti, S.A. Salman and J.Y. Choi, "Fuzzy + PID Controller for Robot Manipulator," *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation.*, pp. 75, Dec. 2006.
- [10] B.W. Bekit, L.D. Seneviratne, J.F. Whidborne and K. Althoefer, "Fuzzy PID Tuning for Robot Manipulators," *IEEE Industrial Electronics Society*, in 24<sup>th</sup> Annual Conference., Vol. 4, pp. 2452–2457, Sep. 1998.
- [11] J.J. Crage, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, 2005.
- [12] Helal, Khaled M. et al. "Gain Scheduling Control with Multi-Loop Pid for 2- Dof Arm Robot Trajectory Control." (2016).
- [13] Okubanjo, A. A.\*, Oyetola, O. K., Osifeko, M. O., Olaluwoye, O. O. and Alao, P. O., "Modeling of 2-DOF Robot Arm and Control,"

Department of Computer and Electrical & Electronics Engineering, Olabisi Onabanjo University, Ago-Iwoye, Nigeria, Dec 2017.

[14] Khaled .M.H, Mostafa R.A. Atia, Mohamed.Abuel-sebah, "Gain Scheduling Control with Multi-Loop PID for 2dof Arm Robot Trajectory Control," Mechanical Engineering Department Arab Academy for Science Technology and Maritime Transport Egypt, Dec 2015.

[15] Namazov, M. Fuzzy Logic Control Design for 2-Link Robot Manipulator in MATLAB/Simulink via Robotics Toolbox. Global Smart Industry Conference (GloSIC),2018.

[16] A. Z. Alassar, I. M. Abuhadrous and H. A. Elaydi "Modeling and control of 5 DOF robot arm using supervisory control," 2010*The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Singapore, 2010, pp. 351-355, doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451398.

[17] Abu Nada, Mohammed Ali. "Sliding Mode Fuzzy Controller Applied to Robot Manipulator." Sliding Mode Fuzzy Controller Applied to Robot Manipulator (2014).

[18] Gao W., Hung J. C.: Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A New Approach, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, pp.45-56, 1993.

[19] Jakub Mo'zaryn, Jerzy E. Kurek.: DESIGN OF THE SLIDING MODE CONTROL FOR THE PUMA 560 ROBOT, 1Institute of Automatic Control and Robotics, Warsaw University of Technology, ul. ´Sw. Andrzeja Boboli 8, 02-525, Warszawa, Poland.

[20] Jakub Mo'zaryn, Jerzy E. Kurek Warsaw University of Technology, Institute of Automatic Control and Robotics, 02-525 Warsaw, POLAND.

[21] Ashi, Mahmoud M. Al. "Trajectory Tracking Control of A 2-DOF Robot Arm Using Neural Networks." (2014).

[22] Guechi, E.-H.; Bouzoualegh, S.; Zennir, Y.; Blažič, S. MPC Control and LQ Optimal Control of A Two-Link Robot Arm: A Comparative Study. Machines 2018.

[23] David, I.; Robles, G. PID Control Dynamics of A Robotics Arm Manipulator with Two Degrees of Freedom. Control De Procesos y Robótica. 2012, pp. 1–7. Available online: <https://fr.slideshare.net/popochis/pidcontrol-dynamics-of-a-robotic-arm-manipulator-with-two-degrees-of-freedom> (accessed on 4 April 2017).

[24] SwapnilDokhe, ShaileshPimpale. A Co-Simulation Approach Based on ADAMS-MATLAB for Development of an Industrial Manipulator, International Engineering Research Journal (IERJ) Special Issue 2 Page 243-248, ISSN 2395-1621, Nov, 2015.

- [25] H. Song, X. Rong and Y. Li, "A co-simulation approach based on ADAMS-SIMULINK for development of manipulator position controller," Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, Xi'an, 2013, pp. 8648-8652.
- [26] Luo, HT et al. "Co-Simulation Control of Robot Arm Dynamics in ADAMS and MATLAB." Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 6 (2013): 3778-3783.
- [27] Chen, J.; Han, D. The Control of Tendon-Driven Dexterous Hands with Joint Simulation. *Sensors* 2014, 14, 1723-1739.
- [28] Hosham Wahballa Abdalla Mahamed, Designing and implementation of PID controller robotic arm, Sudan University of Science and Technology College of Graduate Studies, pp.18, March 2018.
- [29] C.C. Hang, K.J. Astrom, and W.K. Ho, "Refinements of the Ziegler–Nichols Tuning Formula," *IEE Proceedings D Control Theory and Applications.*, Vol. 138, No. 2, pp. 111–118, Mar. 1991.
- [30] Finn Haugen. PID Control, PID tuning when process dynamic varies Page 117-120, August 2004.
- [31] E.H.Mamdani, 'Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis' IEEE Transactions on computer, vol, 26, No. 12, pp.1182-1191, Devc.1977.
- [32] C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics., Vol. 20, No.2, pp. 4 418, March/April 1990.
- [33] MAMDANI, E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasonin using linguistic systems. IEEE Transactions on Computers, vol. 26, 1977, 1182-1191.
- TAKAGI, T and SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, 1985, 116-132.
- [34] W. H. Kwon, S. H. Han, receding horizon control: model predictive control for state models, Springer Science & Business Media, 2006.
- [35] Batra, M. "Dynamics and Model-Predictive Anti-Jerk Control of Connected Electric Vehicles." pp.42 (2018).
- [36] J. A. ROSSITER, "Model-Based Predictive Control", CRC Press, 2005.
- [37] <https://nl.mathworks.com/products/embedded-coder.html>. "Embeded Coder".
- [38] <https://store.arduino.cc/usa/due>.
- [39] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.

- [40] Salem, F.B., Michel, A., & Ziad, A. Mechatronics Engineering Implementation of multilevel control of a complex hybrid robot. 2018
- [41] Ms.Shital, N.Javiya, Design of Model Predictive Control for Position Tracking of DC Servo, M.E Applied instrumentation. 2016
- [42] Samadhi Manasa<sup>1</sup>, Swapna Rani.T<sup>2</sup>, M. Veda chary, POSITION CONTROL OF A DC MOTOR USING PID CONTROLLER, 2015 (IJSEAS).
- [43] [https://en.wikipedia.org/wiki/Motor\\_constants](https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_constants).
- [44] F. Bruno, F. Caruso, L. Falbo, M. Muzzupappa. A CO-SIMULATION BASED DESIGN METHODOLOGY FOR MECHATRONIC PRODUCTS. 1University of Calabria – Department of Mechanical Engineering, AUGUST 2007.