مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

تحسين التتبع والاستقرار الديناميكي لذراع روبوتية DOF-4 باستخدام متحكم PID ضبابي تكيفي قائم على منهجية الخطوات الخلفية

أ.د.م. ثائر احمد ابراهيم *

م. فاطمة علي حبقه **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦/١/٨ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٣/٢)

□ ملخّص □

يتمحور البحث الحالي حول تحسين دقة التتبع وتعزيز الاستقرار الديناميكي للذراع في ظروف مختلفة، بما في ذلك وجود اضطرابات خارجية وأحمال متغيرة وذلك باستخدام مُتحكّم PID ضبابي تكيفي قائم على منهجية الخطوات الخلفية (Backstepping) وتطبيق الدراسة على ذراع روبوتية مفتوحة المصدر بأربع درجات حرية (4-DOF)، حيث تم اختبار وحدة التحكّم المقترحة على مستوى المفاصل ومقارنتها مع وحدة تحكم تجمع بين متحكم تقليدي تعاقبي P-PI ومنهجية الخطوات الخلفية.

بيّنت نتائج المحاكاة في بيئة Matlab/Simulink والمقارنة أنّ وحدة التحكم (التي يجمع بين منهجية الخطوات الخلفية والمتحكم التعاقبي **P–PI**) قادرة على تحقيق استجابة مستقرة للمفاصل في الظروف المثالية الخالية من الاضطرابات والأحمال، إلا أنّ أداءها يتدهور بشكل واضح عند إدخال اضطرابات خارجية أو أحمال متغيرة، مما يؤدي إلى فقدان القدرة على الحفاظ على التتبع الدقيق، في المقابل حققت وحدة التحكم المقترحة (التي تجمع بين منهجية الخطوات الخلفية و مُتحكّم PID ضبابي تكيفي) قدرة على استعادة التتبع بسرعة والحفاظ على استقرار النظام ضمن حدود آمنة عند إدخال حمل متغير الكتلة واضطرابات خارجية على المفاصل.

أظهرت المقارنة بين النتائج بعد التحميل أنّ المُتحكّم PID الضبابي التّكيفي القائم على الخطوة الخلفية قد حسّن كفاءة التتبع بشكل ملحوظ وخفّض من قيمة الخطأ المُطلق المتوسط والتكيف مع التغيرات في الأحمال دون فقدان الاستقرار، وقد بلغ معدل التحسن في الأداء مقارنة بالمتحكمات التقليدية وسطياً للمفاصل الأربعة بين 85% و90% تحت نفس شروط التشغيل، مع إمكانية التعامل مع تغير في الأحمال بنسبة 60% مما يؤكد فعالية المتحكم في تحقيق تعويض سريع وتحقيق استقرار ديناميكي جيد دون اهتزازات طويلة.

الكلمات المفتاحية: مُتحكّم ضبابي تكيفي – منهجية الخطوات الخلفية –ذراع روبوتية DOF-4– الأحمال المتغيرة والاضطرابات الخارجية.

* أستاذ في هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – سورية

** طالبة دكتوراه في هندسة الأتمتة الصناعية – كلية الهندسة التقنية – جامعة طرطوس – سورية.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

Improving the tracking and dynamic stability of a 4-DOF robotic arm using an Adaptive fuzzy PID controller based on a back-stepping methodology

Prof.Dr.Eng. Their Ahmad Ibrahim*

Eng. Fatima Ali Habqa **

(Received 8/1/2026 . Accepted 2/3/2026)

□ ABSTRACT □

Current research focuses on improving tracking accuracy and enhancing the dynamic stability of the robotic arm under various conditions, including external disturbances and variable loads, by employing an adaptive fuzzy PID controller based on the Backstepping methodology. The desired controller is applied to an open-source 4-DOF robotic arm, where the proposed control unit has been tested at the joint level and compare it with a controller that combines a traditional P-PI sequential controller and a back-stepping methodology.

The simulation results in the Matlab/Simulink environment and the comparison show that the controller (which combines the back-stepping methodology and the P-PI sequential controller) is able to achieve a stable joint response under ideal conditions free from disturbances and loads, but its performance deteriorates significantly when external disturbances or variable loads are introduced, resulting in a loss of the ability to maintain accurate tracking. In contrast, the proposed controller (which combines the back-stepping methodology and the adaptive fuzzy PID controller) achieved the ability to quickly restore tracking and maintain system stability within safe limits when variable mass loads and external disturbances are introduced to the joints.

The comparison of results after loading shows that the adaptive fuzzy PID controller based on the Backstepping approach significantly improves tracking efficiency, reduces the mean absolute error, and adapted to load variations without loss of stability. The average performance improvement, compared to conventional controllers, ranges between 85% and 90% across the four joints under the same operating conditions. Moreover, the controller was able to handle load variations up to 60%, confirming its effectiveness in achieving rapid compensation and maintaining good dynamic stability without prolonged oscillations.

Keywords: Adaptive fuzzy controller – Backstepping control – 4-DOF robotic arm – Variable loads and External disturbances

*Professor of Industrial Automation Engineering – Faculty of Technical Engineering – Tartous University, Syria

** PhD Student in Industrial Automation Engineering – Faculty of Technical Engineering – Tartous University, Syria

1. المقدمة introduction:

تزداد أهمية استخدام الأذرع الروبوتية في معظم القطاعات الصناعيّة، حيث أنّها تؤدّي دوراً محوريّاً في المهام التي تتطلّب دقة وتكراراً مثل عمليات اللحام والتجميع والتصنيع الدقيق، وعلى الرغم من التقدّم الكبير في تصميماتِها الميكانيكيّة، يبقى التحدّي الأكبر في تطوير أنظمة تحكّم قادرة على التعامل مع الأنظمة اللاخطّيّة، إضافة إلى تأثّر الأداء بالاضطرابات الخارجيّة وتغيّر الأحمال أثناء التشغيل، ممّا يستلزم استراتيجيات تحكّم متقدّمة تتجاوز الطرق التقليدية (Mustafa et al., 2020) .

تعتمد طرق التحكّم التقليديّة، مثل متحكّمات PID ، على نماذج رياضيّة مثاليّة وتفترض معرفة دقيقة بالبارامترات الديناميكيّة للنظام وهو افتراض نادر التحقّق عمليّاً، ممّا يؤدّي إلى تدهور الأداء عند مواجهة التغيّرات الديناميكيّة أو الأحمال غير المتوقّعة وللتغلّب على هذه القيود، ظهرت تقنيات التحكّم الحديثّة كحلول واعدة (Tinoco et al., 2025).

برزت في الآونة الأخيرة منهجية الخطوات الخلفية Backstepping كإحدى التقنيات الفعالة في تصميم المتحكمات اللاخطية، إذْ تضْمن هذه المنهجيّة استقرار النّظام من خلال بناء دوالّ تحكّم افتراضيّة ودوالِّ لياپونوف (Lyapunov)بشكلٍ تدريجيّ (Zhou et al., 2022) ، ومع ذلك، يبقَى المُتحَكّمُ التقليديّ المُعْتمد على الـ Backsteppingحسّاساً تجاهَ عدم دقّة النّماذج الرياضيّة في حالة الأحمال المتغيرة والاضطرابات الخارجية.

من جهة أخرى يمكن لخوارزميات التحكم الضبابي (Fuzzy Logic Control) تقديم آلية قوية لتعامل مع اللاخطية و الاضطرابات الغير متوقعة، ممّا يجعلُها خياراً واعداً لتعزيز أداء أنظمة التحكُّم الحديثة (Wan and Liu, 2019).

تؤكّد العديد من الدراسات على أهميّة اعتماد تقنيات التحكُّم المتقدّمة لمعالجة تأثير الاضطرابات الخارجيّة وتحسين دقّة التتبُّع وتقليص زمن الاستقرار، حيثُ اقترح بحثٌ نُشِرَ عام (2023) تطويرَ وحداتِ تحكّمٍ P تكيفيّة ضبابيّة، وأظهرت نتائج الدراسة في هذا البحث تحسناً ملحوظاً في أداء النّظام، إذْ أثبتت وحدةُ التحكّم الضبابيّة التكيفيّة القدرة على تقليل نسبة التشغيل وزمن الاستقرار وأداء جيّد عند بقاء وحدة التحكّم ضمن المجال المسموح به لمحرك السيرفو المستخدم، ولم تجهد المشغّل أو تتجاوزه حيث انخفض زمن الاستقرار (Settling Time) إلى حدود 2sec–3sec مع المتحكّم الضبابي التكيفي، مقارنة بـ 5sec مع P التقليدي ونسبة التذبذب (Overshoot) أقل من 5% مع المتحكّم الضبابي التكيفي، بينما تجاوزت 15%مع P التقليدي(Chotikunnan and Pititheeraphab, 2023) .

اقترح بحثٌ (2024) منهجية Backstepping مُدْمَجٌ مع متحكم انزلاقي صّلد (Sliding Mode) لأذرع روبوتيّة تسلسليّة تعمل بمحركات Brushless DC.

أخذ التصميم في الاعتبار ديناميكيّات المحركات الكهربائيّة بالإضافة إلى ديناميكيّات الروبوت ممّا يُعزّز الأداء في وجود عدم اليقين في النموذجين الميكانيكيّ والكهربائيّ، وقد تمَّ إثباتُ الاستقرار باستخدامِ برهانِ (Lyapunov) مع ضمانِ استقرار النظام وتتبُّع جيّد للإشارة، حيث أُجريت تجاربٌ عمليّة على روبوت (2-DOF) لتأكيد فعاليّة الطريقة المُقترحة حيث انخفض زمن الاستقرار بنسبة تصل إلى 40%، ونسبة التذبذب (Overshoot) أقل من 10−5%، وخطأ التتبّع RMS وصل إلى حدود0.01−0.02 (Saka et al., 2024).

وضحت دراسّة (2023) متحكماً ضبابياً تكيفياً غير مباشر لتتبع ذراع روبوتية مرنة بدرجة حريّة واحدة ومحرك Brushless DC مع وجود منطقة ميتة في المدخلات وعدم يقين في النموذج.

أظهرت هذه الدراسة فعّالية الطريقة في تحسين الأداء ودقة التتبع حيث انخفض زمن الاستقرار بنسبة تقريبية 30–40% مقارنة بالتحكم التقليدي ونسبة التذبذب (overshoot) انخفضت إلى أقل من5% ونسبة تشغيل المشغّل (actuator duty) أصبحت أقل من 80–90% (Zhang et al., 2023).

قّدم بحث (2020) متحكماً يجمع بين Backstepping و Sliding Mode Control لتتبع مسار الأذرع الروبوتية مع التركيز على التعامل مع الاضطرابات الخارجية.

أظهرت النتائج أنّ المتحكّم قد حقق استقراراً مع ضمان التتبع الدقيق باستخدام برهان لياپونوف وتمت محاكاة النظام على أذرع روبوتية تعمل بمحركات سيرفو حيث انخفض خطأ التتبّع RMS إلى حدود –0.01 0.02 rad وزمن الاستقرار كان في حدود 2–3sec مقارنة بـ 5sec في الطرق التقليدية ونسبة التذبذب في التحكم بالانزلاق تم تقليلها بشكل ملحوظ عبر القانون التكيفي، لتصبح أقل من 10% من القيمة الأصلية (Zhang et al., 2020).

على الرغم من أن الدراسات السابقة تناولت كلًّا من التحكم الضبابي التكيفي، منهجية الخطوات الخلفية و التحكم PID بشكل منفصل، إلا أنه لا توجد دراسة – بحسب المراجع المتاحة – قامت بدمج متحكم PID ضبابي تكيفي داخل إطار Backstepping لمعالجة اللاخطية وتغيّر الأحمال في ذراع روبوتية متعددة الدرجات 4-DOF كما أن معظم الأعمال السابقة ركّزت على أنظمة منخفضة الدرجات (ذات درجات حرية منخفضة) أو على متحكمات غير تكيفية، دون تقديم آلية موحّدة تجمع بين قوة Backstepping في ضمان الاستقرار وقدرة التحكم الضبابي التكيفي على التعامل مع عدم اليقين والاضطرابات.

لذلك يهدف العمل إلى تطّوير مُتحكّم PID ضبابي تكيفي قائم على منهجية الخطوات الخلفية لذراع روبوتية بأربع درجات حرية بهدف تحسين التتبع والأداء ومعالجة اللاخطية وتعزيز مقاومة الاضطرابات وتغيّر الأحمال.

2. أهمية البحث وأهدافه:

انطلاقاً من أهمية الأذرع الروبوتية وانتشار استخدامها في المجالات الصناعية وغيرها كان لا بد من العمل على تحسين أداءها وضمان استقرارها ورفع موثوقيتها، والتغلب على التأثيرات اللاخطية الناتجة عن تغير الأحمال والاضطرابات غير مؤكدة على المفاصل.

الهدف الرئيس لهذا البحث حول تطّوير مُتحكّم PID ضبابي تكيفي قائم على منهجية الخطوات الخلفية لتحسين أداء الأذرع الروبوتية في تتبع الإشارة، وتم التركيز على الهدفين التاليين:

1. تطّوير مُتحكّم PID ضبابي تكيفي قائم على منهجية الخطوة الخلفية لتوجيه الذراع الروبوتية واختباره في بيئة Matlab.
2. التحقق من قدرة المتحكّم المقترح على التّكيف بفعالية في وجود حمل متغير واضطرابات خارجية غير متوقعة على المفاصل.

3. الذراع الروبوتية المدروسة:

1.3 توصيف الذراع الروبوتية:

تم استخدام النموذج الميكانيكي لذراع روبوتية مفتوح المصدر Open Manipulator (ROBTS, 2020) (robot arm 4-DOF)، تعطى بارامتراته الديناميكية وفق الجدول (1).

الجدول (1): البارامترات الديناميكية للذراع المدروسة

كتل الوصلات m_i	m_1=104.83g, m_2=134.67g, m_3=134.67g, m_4=24.6g
أطوال الوصلات l_i	L_1 = 0.077 m, L_2 = 0.130 m, L_3 = 0.135m, L_4 = 0.126 m
عزم القصور الذاتي للوصلات I_i	I_1= 4.5×10^{-5} kg·m², I_2=1.1×10^{-5}kg·m², I_3=7.8×10^{-5} kg·m², I_4=1×10^{-5} kg·m²
معاملات التخميد	0.01–0.05 N·m·s/rad

حيث يمكن التعبير عن المعادلة العامة لديناميكيات ذراع روبوتية 4-dof بالشكل التالي [10],[9] :

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = \tau \quad (1)$$

هذه المعادلة تمثل النموذج الديناميكي في فضاء المفصل مباشرةً (Joint-space dynamics)، حيث $M(q)$ مصفوفة الكتلة تمثل تأثير العطالة على حركة المفاصل و$C(q,\dot{q})$ مصفوفة قوى كوريوليس والاحتكاك المركزي الناتجة عن حركة المفاصل و$G(q)$ متجه قوى الجاذبية $F(\dot{q})$ قوى الاحتكاك التي تعتمد على سرعة المفاصل وτ متجه العزوم و$q, \dot{q}, \ddot{q}$ متجه الزاوية والسرعة والتسارع الزاوي بالترتيب.

لكن في التطبيقات الواقعية تتأثر البارامترات الديناميكية للروبوت (مثل كتل الوصلات، القصور الذاتي، ومعاملات الاحتكاك) بوجود حمل متغير واضطرابات خارجية غير مؤكدة، يمكن كتابة المعادلة الديناميكية (1) لتشمل الاضطرابات والأحمال المتغيرة حيث يمكن تقسيم النموذج الديناميكي إلى جزأين: جزء معروف وجزء غير معروف (يتأثر بالحمل المتغير والاضطرابات):

$$\big(M_0(q) + \Delta M(q)\big)\ddot{q} + \big(C_0(q,\dot{q}) + \Delta C(q,\dot{q})\big)\dot{q} + \big(G_0(q) + \Delta G(q)\big) + \big(F_0(\dot{q}) + \Delta F(\dot{q})\big) + d = \tau \quad (2)$$

حيث:

$G_0(q), M_0(q), C_0(q,\dot{q})$,: هي الأجزاء المعروفة للمعادلات الديناميكية.

$\Delta G(q), \Delta C(q,\dot{q}), \Delta F(\dot{q}), \Delta M(q)$: تمثل عدم اليقين الناتج عن الاختلاف بين النموذج النظري والبارامترات الفعلية عند تغير الاحمال.

d : تمثل الاضطرابات الخارجية غير القابلة للنمذجة.

يمكن تبسيط المعادلة (2) بدمج جميع الأجزاء غير المعروفة في متجه واحد:$\Phi(q,\dot{q},\ddot{q})$

$$\Phi(q,\dot{q},\ddot{q}) = \Delta M(q)\ddot{q} + \Delta C(q,\dot{q})\dot{q} + \Delta G(q) + \Delta F(\dot{q}) + d \quad (3)$$

وبالتالي تصبح المعادلة الديناميكية التي سيتم العمل عليها في تصميم المتحكم:

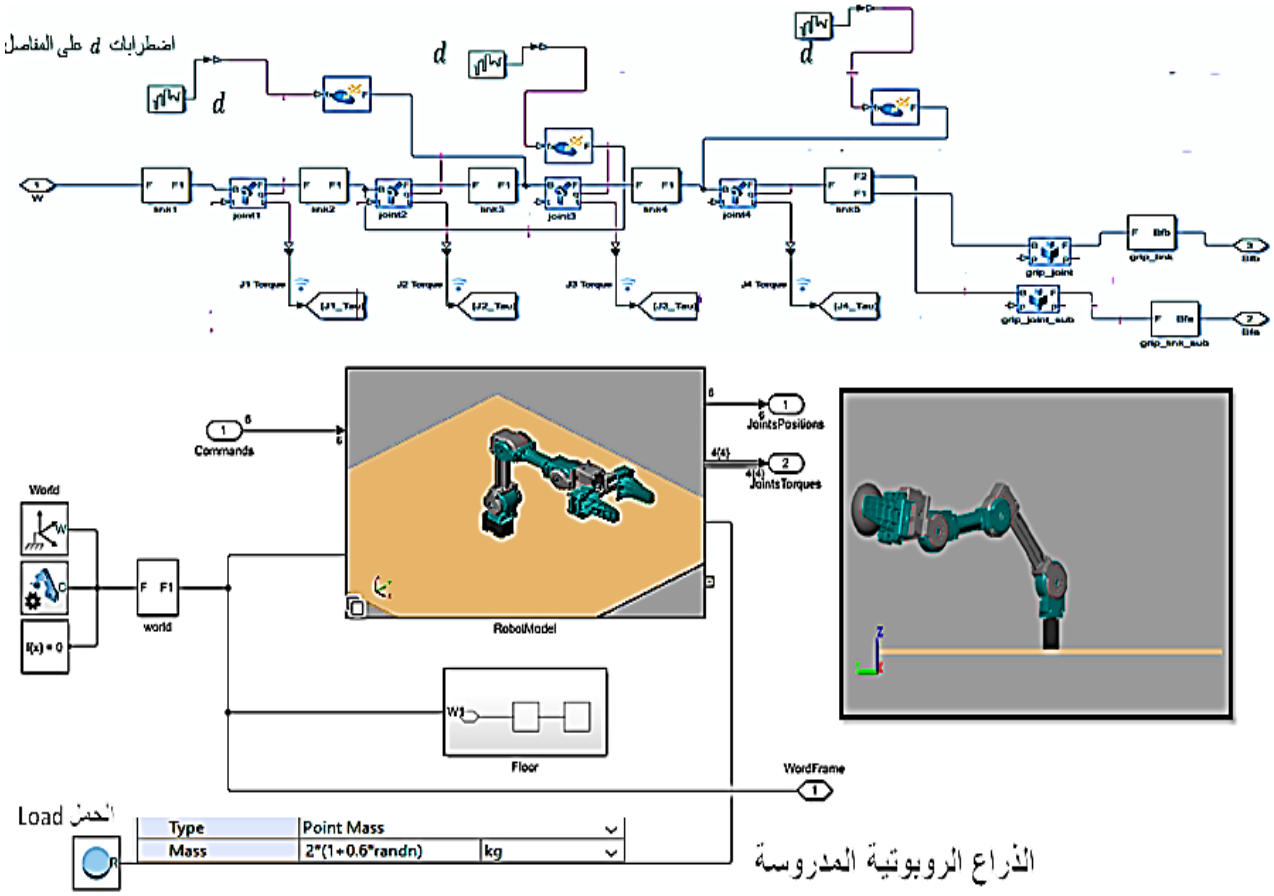
$$M_0(q)\ddot{q} + C_0(q,\dot{q})\dot{q} + G_0(q) + F_0(\dot{q}) + \Phi(q,\dot{q},\ddot{q}) = \tau \quad (4)$$

إن وجود المتجه $\Phi(q,\dot{q},\ddot{q})$ هو التحدي الرئيسي والمشكلة الأساسية التي يجب على المتحكم PID التكيفي الضبابي القائم على منهجية الخطوات الخلفية التعامل معه، حيث سيتم تضمين متحكم PID ضبابي تكيفي كطبقة تعويض تعمل مع منهجية الخطوة الخلفية (Backstepping) إذ يقوم المتحكم الضبابي بتوليد

إشارات ضبط تكيفية لثوابت المتحكم PID (K_P, K_I, K_D)، بما يضمن تحسين دقة التتبع وتعويض اللاخطيات والاضطرابات غير المعروفة".

2.3 نمذجة الذراع الروبوتية:

يُظهر الشكل (1) نموذج الذراع الروبوتية المدروسة في بيئة Matlab مع حمل متغير واضطرابات خارجية على المفاصل، تم إدخال قيم عشوائية للاضطرابات $randn * 0.5$ وقيم عشوائية للأحمال $m * (1 + randn * 0.6)$ (كتلة الحمل بـ kg × (1+ نسبة تغير الحمل × تابع يولد قيم عشوائية))، حيث تتيح لنا المكتبة "Sims cape" بناء نماذج للأذرع الروبوتية بمرونة وبشكل قريب إلى حد كبير من النموذج الفعلي واستخراج النموذج الرياضي الذي يصف ديناميكيات النظام الروبوتي المصمم في هذه البيئة عن طريق تحديد بارامترات النموذج في Simulink (مثل كتل الوصلات، أطوالها، وقصورها الذاتي، ....)، كما يظهر في الجدول(1) إذ يتم حساب هذه المصفوفات والمتجهات في بيئة MATLAB/Simulink_Sims cape.



الشكل (1): نموذج الذراع الروبوتية المدروسة في بيئة MATLAB/Simulink_Sims cape مع حمل متغير واضطرابات خارجية على المفاصل.

4. تصميم المتحكم الضبابي التكيفي القائم على منهجية الخطوات الخلفية:

يعتمد تصميم المُتحكّم المُقترح على دمج منهجية الخطوات الخلفية مع التحكم الضبابي التكيفي (لتقدير ومعالجة عدم اليقين واللاخطية الناتجة عن الأحمال والاضطرابات الخارجية لضمان دقة التتبع والاستقرار الكلي للنظام).

1. منهجية الخطوات الخلفية:

يُعد الـ Backstepping منهجًا منظمًا لتصميم متحكمات للأنظمة اللاخطية ذات البنية المتدرجة، يتمثل المبدأ في بناء دالة لياپونوف حيث يتم في كل خطوة تصميم قانون تحكم افتراضي (Virtual Control Law) للمتغيرات الداخلية للنظام، وجعل خطأ التتبع يقارب الصفر (Zhang et al., 2020; Vaidyanathan and Azar, 2020).

لنبدأ بتعريف خطأ التتبع:

$$e_1 = q_d - q \quad (5)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (6)$$

حيث q_d هو المسار المطلوب وq المسار الفعلي.

وليكن لدينا المتحكم الافتراضي:

$$a = \dot{q}_d - k_1 e_1 \quad (7)$$

وخطأ المتحكم الافتراضي وإشارة التحكم:

$$z = \dot{q} - a$$

$$u = \ddot{q}_d - k_1 e_2 - k_2 z \quad (8)$$

حيثu العزم أو القوة التي ستُطبق على المفصل لضمان التتبع الدقيق مع استقرار النظام.

دالة لياپونوف المقترحة لاستقرار النظام المدروس:

$$V(e_1, z) = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} z^2 \quad (9)$$

الدالة معرفة وتساوي صفراً عندما: $e_1 , z = 0$=0

اشتقاق دالة لياپونوف تحت قانون التحكم، حيث لدينا:

$$\dot{q} = dq \quad , u = ddq = \ddot{q} \quad (10)$$

فإن ديناميكيات الأخطاء تصبح:

$$\dot{e}_1 = \dot{q}_d - \dot{q} = -z + k_1 e_1 \quad , \dot{z} = \ddot{q} - \dot{a} = u - \dot{a} \quad (11)$$

$$e_2 = \dot{q}_d - \dot{q} = -z + k_1 e_1 \quad (12)$$

ومنه:

$$u = \ddot{q}_d - k_1 e_2 - k_2 z \quad (13)$$

وبما أنّ $\dot{a} = \ddot{q_d} - k_1\dot{e}_1 = \ddot{q_d} - k_1(-z + k_1e_1)$ ينتج مباشرة:

$$\dot{z} = -k_2z \ , \dot{e}_1 = -z + k_1e_1 \quad (14)$$

عليه، مشتق دالة لياپونوف المختارة:

$$\dot{V} = e_1\dot{e}_1 + z\dot{z} = e_1(-z + k_1e_1) - k_2z^2 = -e_1z \ + k_1e_1^2 - k_2z^2 \quad (15)$$

البرهنة على شرط السلبية باستخدام عدم مساواة يونغ:

$$e_1z \leq \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}z^2 \quad (16)$$

$$\dot{V} \leq -\left(k_1 - \frac{1}{2}\right)e_1^2 - \left(k_2 - \frac{1}{2}\right)z^2 \quad (17)$$

وعليه تكون $\dot{V} < 0$ إذا كانت $k_1 > \frac{1}{2}$ ، $k_2 > \frac{1}{2}$ حيث يحقق الاستقرار الآسي لأخطاء التتبع.

2. المُتحكّم PID الضبابي التكيفي (Adaptive Fuzzy PID Control) :

في الأنظمة الروبوتية غير الخطية، يُعدّ متجه عدم اليقين Φ الناتج عن الاضطرابات الخارجية وتغيّر الحمل من أهم العوامل التي تؤثر سلبًا على دقة التتبع والاستقرار وبدلًا من إهمال هذا المتجه أو افتراضه صفرًا، تم في هذا العمل اعتماد منطق ضبابي تكيفي لتقدير تأثيره وتعويضه بشكل لحظي، يعتمد هذا النهج على بناء منظومة ضبابية تكيفية مع متحكم PID تقليدي، بحيث يتم تعديل معاملات المتحكم بصورة غير خطية وفقًا لحالة النظام.

يعتمد المتحكم الضبابي على كل من الخطأ ومعدل تغيّر الخطأ (مشتق الخطأ) كمدخلين أساسيين، حيث تمر الإشارة عبر مراحل التكميم الضبابي، وتفعيل القواعد، ثم إزالة الضبابية لإنتاج إشارة ضبط إضافية تُضاف إلى خرج متحكم PID التقليدي، مما يعزز قدرة النظام على التعامل مع اللاخطية وعدم اليقين (Wei, 2018; Wan and Liu, 2019).

حيث تعطى الصيغة الرياضية لقانون التحكم PID التقليدي وفق العلاقة (18):

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t)\int_0^t e(\tau)d\tau + k_d\dot{e}(t) \quad (18)$$

حيث:

$$e = q_d(t) - q(t) \ , \dot{e} = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t) \quad (19)$$

وبالنظر إلى أن المتحكم يعمل في بيئة رقمية، تتم إعادة كتابة القانون بصيغة متقطعة بزمن أخذ العينة T_S، يمكن إعادة كتابة العلاقة (18)،خلال زمن التقطيع T_S (زمن أخذ العينة):

$$U[K] = K_P[K]e[k] + k_i[k]I[K] + K_d[k]\frac{e[k]-e[k-1]}{T_S},\ I[k] = I[k-1] + e[k]T_S \quad (19)$$

يتم جعل معاملات المتحكم K_P, K_d, k_i متغيرة زمنياً عبر قانون تكيف يعتمد على منظومة ضبابية ذات دوال انتماء غاوصية للمدخلين $\dot{e}, e$ (نظام Zero-Order Takagi–Sugeno).

$$\mu_{e,i}(e) = \exp(-\frac{\left(e - c_{e,i}\right)^2}{2\sigma_e^2}), \qquad \mu_{\dot{e},i}(\dot{e}) = \exp(-\frac{\left(\dot{e} - c_{\dot{e},j}\right)^2}{2\sigma_{\dot{e}}^2}) \quad (20)$$

يتم حساب درجات تفعيل القواعد:

$$\emptyset(e,\dot{e}) = \mu_{e,i}(e)\mu_{\dot{e},j}(\dot{e}), \quad r \equiv (i,j) \in \{1\ 2\ 3\} \quad (21)$$

حيث لدينا 3×3 من القواعد.

إزالة الضبابية لإنتاج تعديل الثوابت:

$$\Delta k_p = \frac{w_p^T \emptyset}{\sum \emptyset}, \Delta k_i = \frac{w_i^T \emptyset}{\sum \emptyset}, \Delta k_d = \frac{w_d^T \emptyset}{\sum \emptyset}, \quad (22)$$

حيث$\emptyset$ متجه درجات التفعيل للقواعد، وw أوزان يتم تحديثها تكيفياً.

يتم تحديث معاملات PID وفق:

$$k_p(t+1) = k_p(t) + a_p \Delta k_p T_S, k_i(t+1) = k_i(t) + a_i \Delta k_i T_S,\ k_d(t+1) = k_d(t) + a_d \Delta k_d T_S \quad (23)$$

حيث $a_p\ , a_i\ , a_d$ معاملات التكيف(Adaptation Gains) ، وتعّد معاملات تصّميمية تُضبط وفق أداء النظام، فهي تتحكم بسرعة تعديل ثوابت الـ PID ، ويجب اختيارها بحيث تحقق توازنًا بين سرعة الاستجابة والاستقرار، حيث أن القيم الكبيرة جدًا قد تسبب تذبذبًا أو عدم استقرار، بينما القيم الصغيرة تجعل التكيف بطيئًا.

القيم المستخدمة في بنية المتحكم هي $a_p = 0.005، a_i = 0.0001، a_d = 0.0005$ هذه القيم تضمن استجابة تكيفية كافية دون التسبب في تذبذبات الإشارة ، وقد تم ضبطها تجريبيًا عبر المحاكاة لتحقيق أفضل أداء تتبع مع الحفاظ على استقرار النظام.

حيث قانون التكيف للأوزان يعتمد على خوارزمية (LMS(Least Mean Squares)-like):

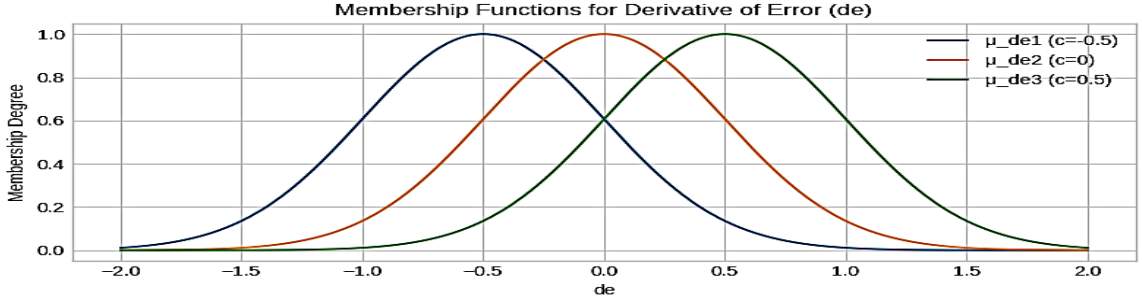
$$W_{P,NEW} = W_P[K] + \eta_P \phi[K] e[K] T_S \quad (24)$$

- $W_P[K]$ قيمة الوزن عند الخطوة السابقة.
- η_P معدل التعلم (learning rate) أو معامل التكيف.
- $\phi[K]$ متجه التفعيل الضبابي عند الخطوة k.
- $e[K]$ الخطأ عند الخطوة k .

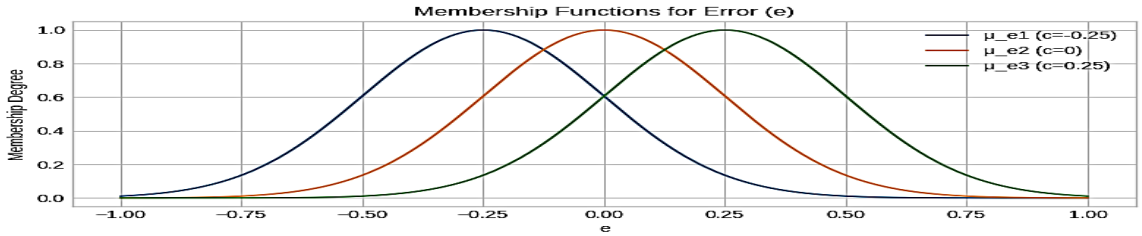
يظهر الشكل (2) دوال الانتماء الخاصة بالدخل حيث تم تمثيل متغيرات الدخل في وحدة التحكم المقترحة بثلاث توابع انتماء غاوصية، أما الخرج قيمة crisp مباشرة.

حيث الشكل العام لقواعد Sugeno يُعطى If e is A_i and e˙ is $B_j \Rightarrow y = W_{ij}$ و W_{ij} موجودة داخل المتجهات k_p, k_i, k_d يتم تحديثها تكيفيًا باستخدام LMS-like .

أي يتم تنفيذ عملية فكّ التضبيب في المتحكم المقترح باستخدام بنية Sugeno ، حيث تنتج كل قاعدة ضبابية قيمة عددية (وزن W_{ij}) بدلًا من مجموعة ضبابية، يتم دمج هذه القيم باستخدام متوسط موزون يعتمد على قوة إطلاق كل قاعدة كما هو موضح في المعادلات(20)،(21)، مما يعطي قيمًا عددية مباشرة لزيادة معاملات PID (ΔKp, ΔKi, ΔKd) كما هو مبين في المعادلة (23) بعد ذلك، تُستخدم هذه الإشارات التكيفية لتحديث معاملات PID في كل خطوة زمنية وفق قوانين التحديث التدريجي وفق المعادلة (24)، بحيث تزداد Kp عند الخطأ الكبير، وتزداد Ki عند وجود خطأ متبقٍ صغير، بينما تُعدّل Kd حسب سرعة تغير الخطأ، هذه الآلية تجعل المتحكم قادرًا على التكيف الفوري مع الاضطرابات والأحمال المتغيرة، وتحسين أداء التتبع مقارنة بالمتحكمات التقليدية.



(a)



(*b*)

الشكل(2):a-دوال الإنتماء لمشتق الخطأ،b- دوال الإنتماء لإشارة الخطأ (الدخل).

تم اختيار دوال الانتماء من النوع الغاوصي نظرًا لنعومتها واستمرارية مشتقاتها، وهو ما يجعلها مناسبة للأنظمة التكيفية التي تعتمد على تحديثات تدريجية للأوزان مثل خوارزمية (LMS –like) كما أن الدوال الغاوصية توفر انتقالًا سلسًا بين القواعد وتتعامل بكفاءة مع الضوضاء والاضطرابات، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات التحكم في الروبوتات .

يظهر الشكل (2) مجالات المتغيرين e و $e˙$ بحيث تشمل القيم السالبة والموجبة نظرًا لكون الخطأ ومشتقه كميّات موقّعة بطبيعتها، إذ يمكن أن يكون الروبوت متأخرًا عن المسار المطلوب (خطأ موجب) أو متقدّمًا عليه (خطأ سالب)، كما تم تطبيع هذه القيم (Error Normalization) ضمن مجال محدود لضمان استقرار الحسابات الضبابية وتسهيل تصميم دوال الانتماء الغاوصية، وتم توزيع مراكز دوال الانتماء عند قيم سالبة

وصفرية وموجبة لتمثيل حالات الخطأ المختلفة بشكل متوازن، بينما تم اختيار قيم σ بحيث توفر تداخلًا مناسبًا بين الدوال دون فقدان التمييز بينها.

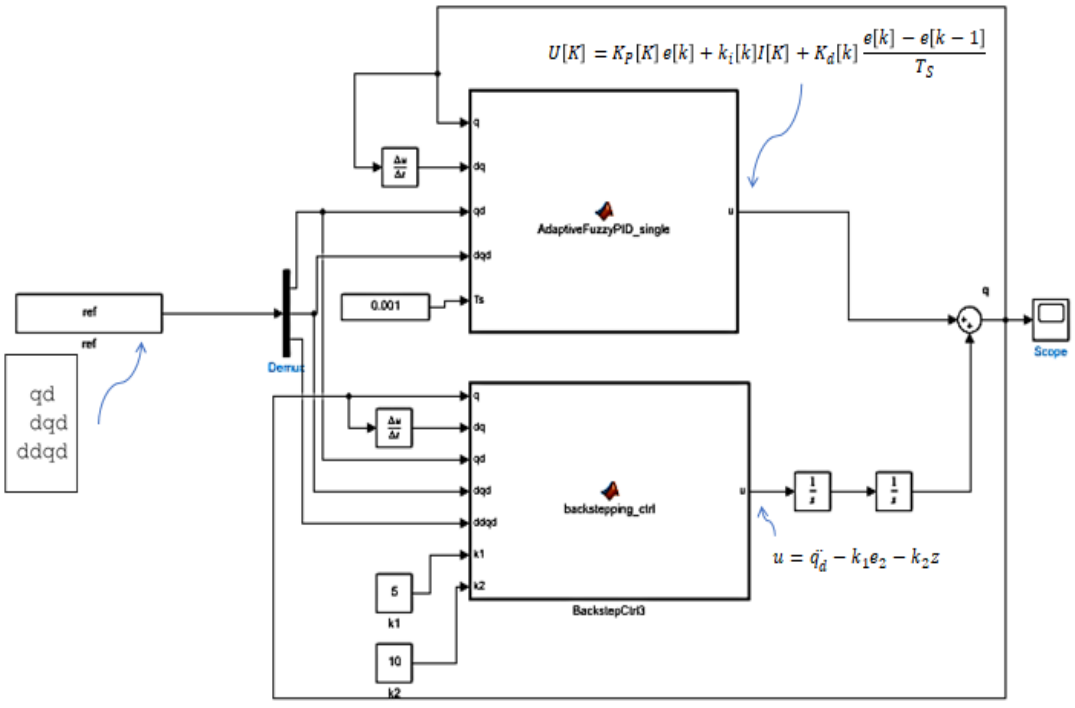
يظهر الجدول(2) بناء القواعد الضبابية اعتمادًا على منطق التحكم التقليدي لمتحكمات PID ، حيث تم استخدام ثلاث مجموعات ضبابية للخطأ (سالب، صفري، موجب) وثلاث مجموعات لمشتق الخطأ، مما ينتج عنه تسع قواعد تغطي جميع حالات التشغيل الممكنة.

الجدول(2) بناء القواعد الضبابية.

حالة الخطأ e	حالة مشتق الخطأ $\dot{e}$	تأثير القاعدة على معاملات PID
سالب/موجب كبير	سالب أو موجب كبير	زيادة k_p لتحسين التتبع
قريب من الصفر	أي قيمة	زيادة k_i لإزالة الخطأ المتبقي
مشتق خطأ كبير	موجب	زيادة k_d لتقليل التذبذب
مشتق خطأ كبير	سالب	تقليل k_d لتجنب التضخيم

تُستخدم مخرجات هذه القواعد (ΔKp, ΔKi, ΔKd) لتحديث معاملات PID بشكل تكيفي في كل خطوة زمنية، مما يسمح للمتحكم بالتعامل بفعالية مع التغيرات المفاجئة في الحمل والاضطرابات الخارجية.

يظهر الشكل(3) المخطط الصنوقي للمُتحكّم الضبابي التكيفي القائم على منهجية الخطوة الخلفية المُصمم للمفصل الواحد لتحسين أداء و تتبع ذراع روبوتية 4−DOF، تم إضافات المُتحكّمات المُصممة وفق المعادلات السابقة إلى النموذج في بيئة Matlab/Simulink كـ function Block.

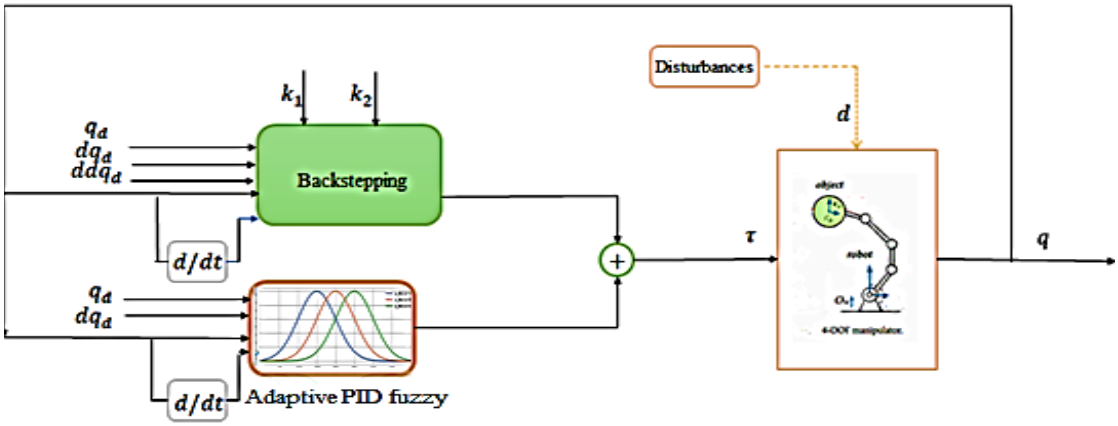


الشكل(3): المخطط الصنوقي للمُتحكّم المُصمم للمفصل الواحد.

حيث تمثل q زاوية المفصل المقاسة و dq مشتق الزاوية المقاسة، ويمثل المقدار q_d الزاوية المطلوبة و dq_d المشتق الأول للزاوية المطلوبة، ddq_d المشتق الثاني للزاوية المطلوب(صندوق ref)، أما بالنسبة للمقدار

T_s هو زمن العينة، تم اختيارها بقيمة صغيرة 0.001sec للحصول على دقة عالية في التتبع والمحافظة على استقرار النظام، تم التركيز في هذا العمل على مستوى المفصل لذلك سيتم إضافة أربع مُتحكّمات، مُتحكّم لكل مفصل لمتابعة وتحسين الاستجابة الزمنية عند حالات اللاحمل وحالات الحمل المتغير ووجود اضطرابات خارجية ودراسة المقدرة على تتبع الإشارة.

يظهر الشكل (4) المخطط الصندوقي للنظام الروبوتي مع المتحكمات اللاخطية.

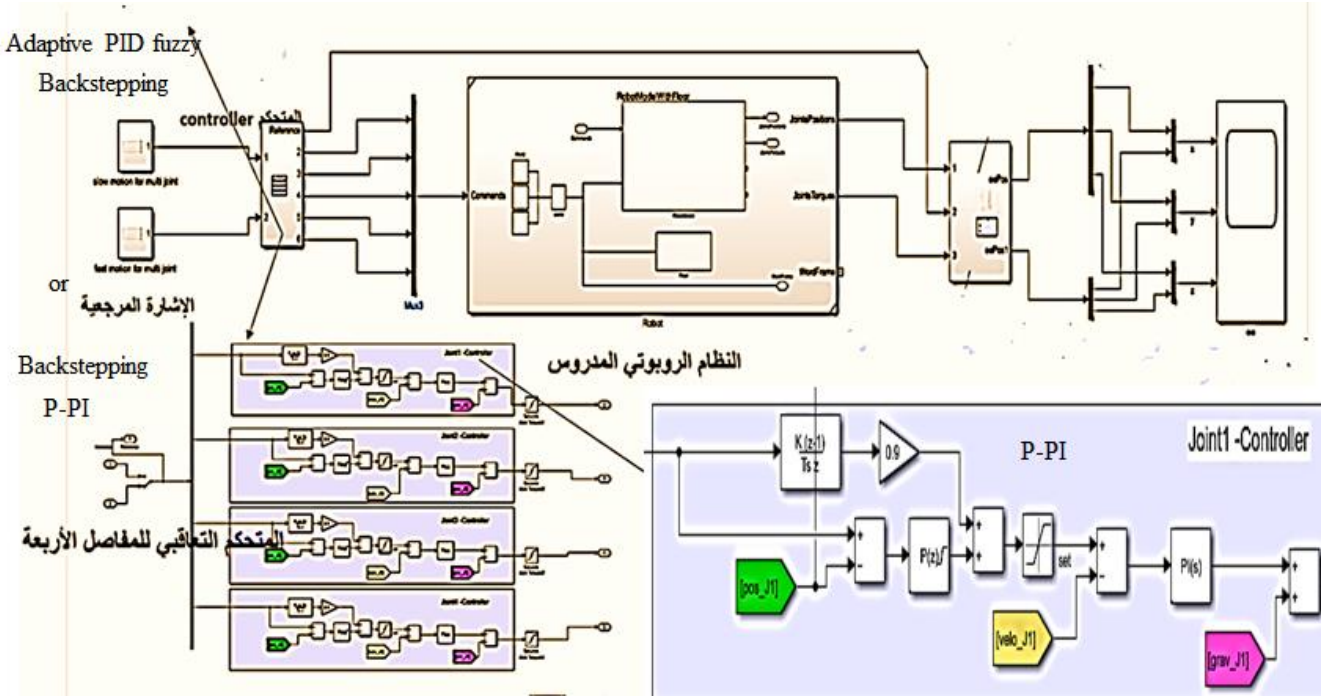


الشكل (4): النظام الروبوتي مع المُتحكّم المقترح.

3. المتحكم التعاقبي التناسبي – التناسبي التكاملي P-PI:

انطلاقا من متحكمات الـ PID يمكننا تصميم متحكم تعاقبي P-PI على مستوى المفصل، وقد تم اعتماد هذه البنية نظرًا لطبيعة ديناميكا الذراع الروبوتية حيث تم بناء حلقتي تحكم داخلية وحلقة تحكم خارجية (Liu et al., 2023)، إذ تُعد سرعة المفصل متغيرًا سريع الاستجابة مقارنة بالموضع، لذلك تم تصميم حلقة داخلية للتحكم بالسرعة باستخدام متحكم P فقط، وذلك لتجنب تضخيم الضجيج الناتج عن قياس السرعة ولضمان استجابة سريعة ومستقرة، أما الحلقة الخارجية الخاصة بالموضع فقد تم استخدام متحكم PI فيها لإزالة الخطأ المتبقي وتحقيق تتبع دقيق و.تم إهمال الجزء التفاضلي D في كلتا الحلقتين لأن استخدامه في الحلقة الداخلية يؤدي إلى تضخيم الضجيج واهتزازات غير مرغوبة، بينما لا تحتاج الحلقة الخارجية إلى مشتق الخطأ نظرًا لقيام الحلقة الداخلية بتخميد الديناميكا السريعة، هذا الاختيار يتوافق مع الممارسات الصناعية الشائعة في أنظمة التحكم بالروبوتات.

يظهر الشكل(5) النظام الروبوتي والمتحكمات المدروسة، حيث تم تطوير متحكم لا خطي يعتمد على منهجية الخطوات الخلفية Backstepping كقاعدة (طبقة أساسية لتوليد العزم أو التسارع المطلوب ومنه الموضع q) التي توفر إطارًا منهجيًا لبناء متحكمات مستقرة تدريجيًا عبر مستويات النظام، مع وحدة PID تحكم ضبابية تكييفيه من (طبقة تصحيحية) تقوم بتعديل إشارة التحكم لتحقيق دقة التتبع وضبط المسار وتعويض الخطأ بالتعاون مع الـ Backstepping في حالات الأحمال المتغيرة والاضطرابات الخارجية وتمت مقارنة الأداء مع وحدة تحكم تجمع بين منهجية الخطوات الخلفية والمتحكم التعاقبي.



الشكل (5): النظام الروبوتي والمتحكمات المدروسة.

5. الاختبار البرمجي للنظام الروبوتي المُصّمم:

تم إجراء الاختبارات بتطبيق إشارة دخل متناوبة sine على مفاصل الذراع الروبوتية، مما يتيح اختبار المتحكم للأداء الديناميكي عند حالات مختلفة من (تغير الاتجاه، التسارع، التباطؤ، توقف، قياس الاستقرار والتخميد، دقة التتبع).

الاختبار الأول: الأداءمن دون حمل.

تم في هذا الجزء محاكاة منهجية الـ Backstepping مع متحكم تقليدي تعاقبي P_PI دون وجود حمل أو اضطرابات في النموذج كما يظهر في الأشكال(6),(7).

يظهر الجدول(3) قيم المتحكم P-PI على مستوى المفصل لحلقتي التحكم بالموضع والتحكم السرعة.

الجدول (3) قيم المتحكم P-PI على مستوى المفصل.

رقم المفصل J	قيم ثوابت المتحكم P-PI على مستوى المفصل
1	Joint1_Cascade_ControllerPosition_Kp = 2.022 Joint1_Cascade_ControllerVelocity_Kp =0.3193*10.88 Joint1_Cascade_ControllerVelocity_Ki = 0.3193
2	Joint2_Cascade_ControllerVelocity_Kp =1.97 Joint2_Cascade_ControllerVelocity_Kp =0.2834*15.19 Joint2_Cascade_ControllerPosition_Ki = 0.2834
3	Joint3_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 1.93 Joint3_Cascade_ControllerVelocity_Ki =0.307*42.1 Joint3_Cascade_ControllerPosition_Kp = 0.307
4	Joint4_Cascade_ControllerVelocity_Kp = 2.94 Joint4_Cascade_ControllerVelocity_Kp =0.2722*224.3 Joint4_Cascade_ControllerPosition_Ki = 0.2722

الاختبار الثاني: الأداء مع حمل واضطرابات خارجية.

تم في هذا الجزء دراسة حالات عدم اليقين التالية (اضطرابات خارجية – تغير في كتلة الحمولة (حمولات صغيرة 2kg) مع متحكم تقليدي تعاقبي ومنهجية الـ Backstepping كما يظهر في الأشكال(8),(9)، حيث تم تغير كتلة الحمل حتى 30% $(m * (1 + 0.3 * randn))$ (تتغير قيمة الحمولة من 0 حتى معدل زيادة في كتلة الحمولة بمقدار 30%) وإضافة اضطرابات خارجية (Disturbance forces/Torque) على المفاصل(تم إضافة اضطراب خارجي على كل مفصل على شكل عزم أو قوة أثناء المحاكاة، وقد تم اختيار الاضطراب بقيمة 0.5 randn(t) وهو اضطراب غاوسي بمتوسط صفر وانحراف معياري $0.5N.m$، وهو اختيار شائع في محاكاة الأنظمة الروبوتية لتمثيل اضطرابات غير متوقعة.

الاختبار الثالث: الأداء مع حمل واضطرابات خارجية ومتحكم ضبابي تكيفي.

في هذا الجزء تم التركيز على إظهار قدرة المُتحكّم PID الضبابي التكيفي القائم على منهجية الخطوات الخلفية على تعويض الخطأ الناتج عن حالات تغير الأحمال حتى 60%:$(m * (1 + 0.6 * randn))$ وحالات الاضطرابات الخارجية.

حيث تبدأ معاملات الـ PID بالقيم الابتدائية $\boldsymbol{K_P = 20, K_I = 1, K_D = 0.5}$، ثم يتم تعديلها تكيفياً في كل خطوة زمنية وفق قوانين التحديث المعطاة في (23)، تعتمد الزيادة $\boldsymbol{\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D}$ على مخرجات النظام الضبابي وأوزان Sugeno التي يتم تحديثها باستخدام خوارزمية LMS-Like كما هو موضح في الجدول (4)، بعد التكيف، تصل معاملاتPID إلى قيم جديدة تعتمد حالة الخطأ والاضطرابات، وقد بلغت في نهاية المحاكاة عند زيادة في الحمل 60%:

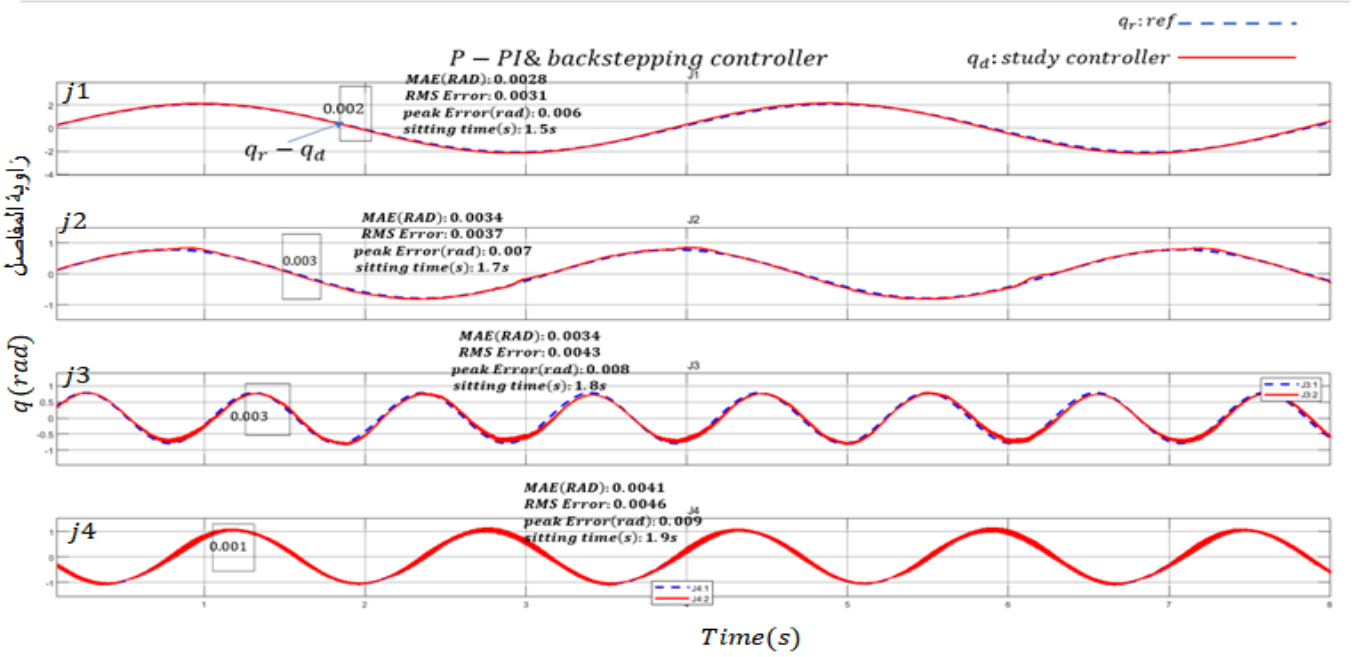
$$\boldsymbol{K_{Pfinal} = 3.47213, K_{Ifinal} = 0.31029, K_{Dfinal} = 0.18542}$$

حيث نلاحظ أنه تم الحفاظ على دقة التتبع كما يظهر في الأشكال (10)، (11)، مع الانتباه أن هذه القيم ليست ثابتة، بل تتغير ديناميكياً لضمان أداء تتبع والاستقرار تحت الأحمال و الاضطرابات.

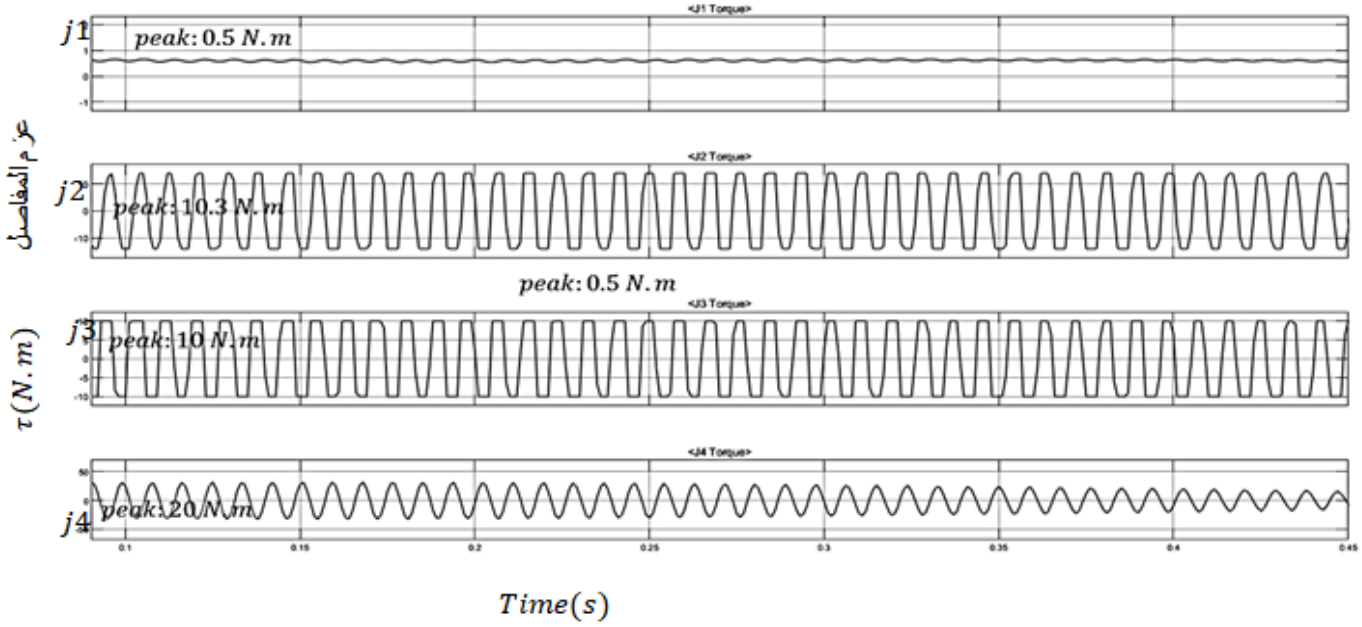
الجدول(4) معاملات المتحكمات Adaptive PID Fuzzy&& Backstepping

متحكم Backstepping الخطوة الخلفية	Adaptive PID Fuzzy		
الثوابت	قيم PID بعد التكيف عند زيادة في الحمل60%	معاملات التكيف	القيم الابتدائية لل PID
$K_1 = 5$	K_{Pfinal} =3.47213	$a_p = \eta_P = 0.005$	$K_P = 20$
$K_2 = 10$	K_{Ifinal} =0.31029	$a_i = 0.0001$	$K_I = 1$
	K_{Dfinal} =0.18542	$a_d = 0.0005.$	$K_D = 0.5$

الاختبار الأول

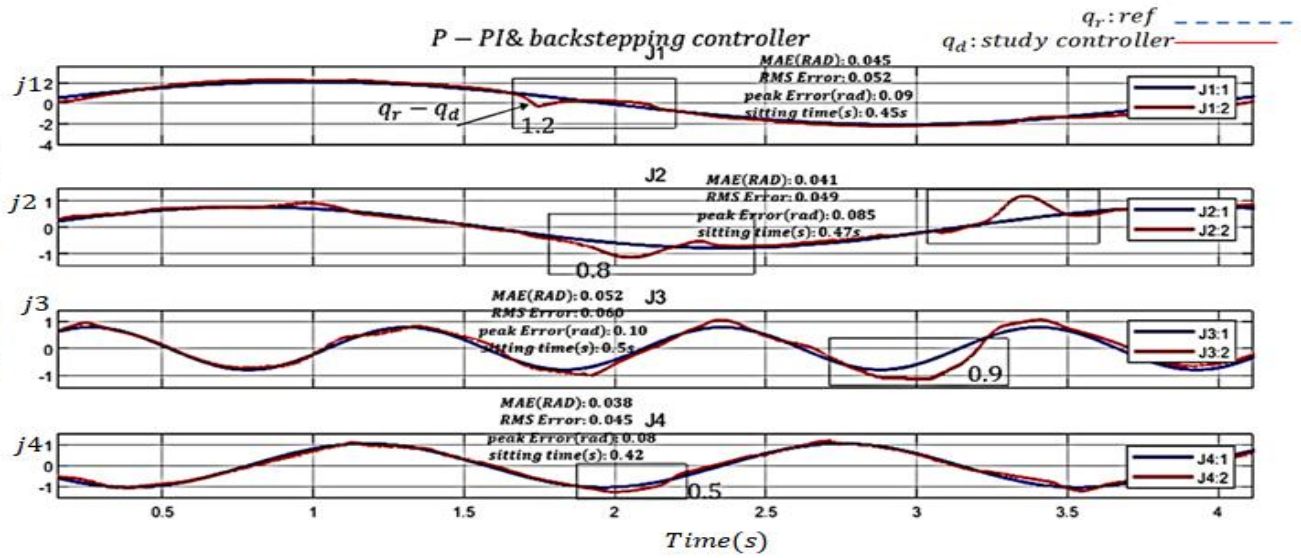


الشكل (6): إشارة مفاصل الذراع الروبوتية من دون حمل.

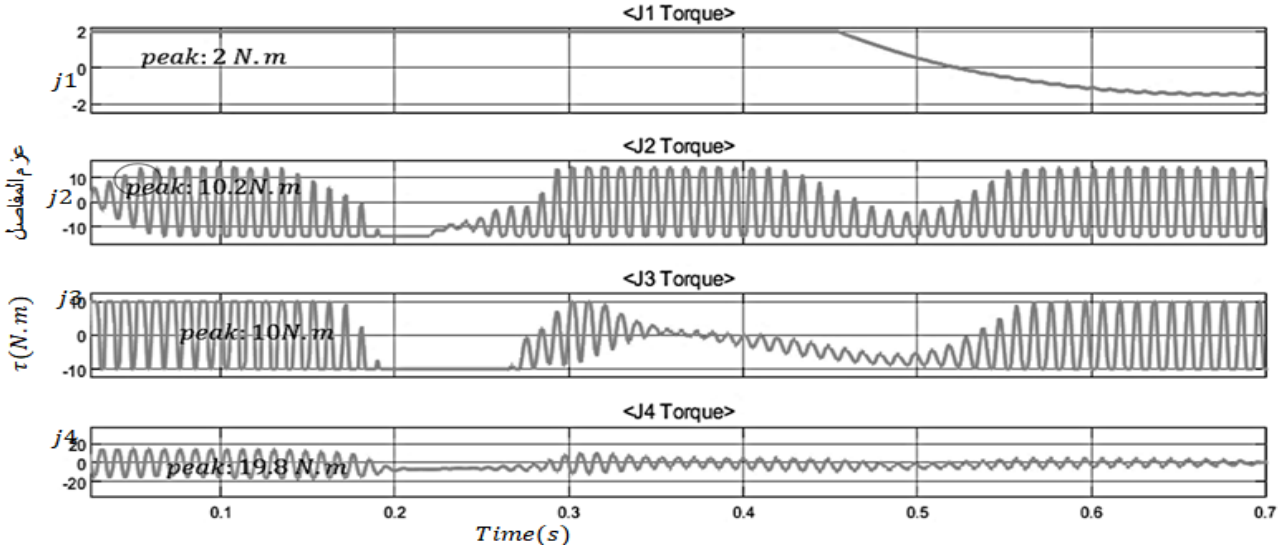


الشكل (7): إشارة العزم لمفاصل الذراع الروبوتية من دون حمل.

الاختبار الثاني

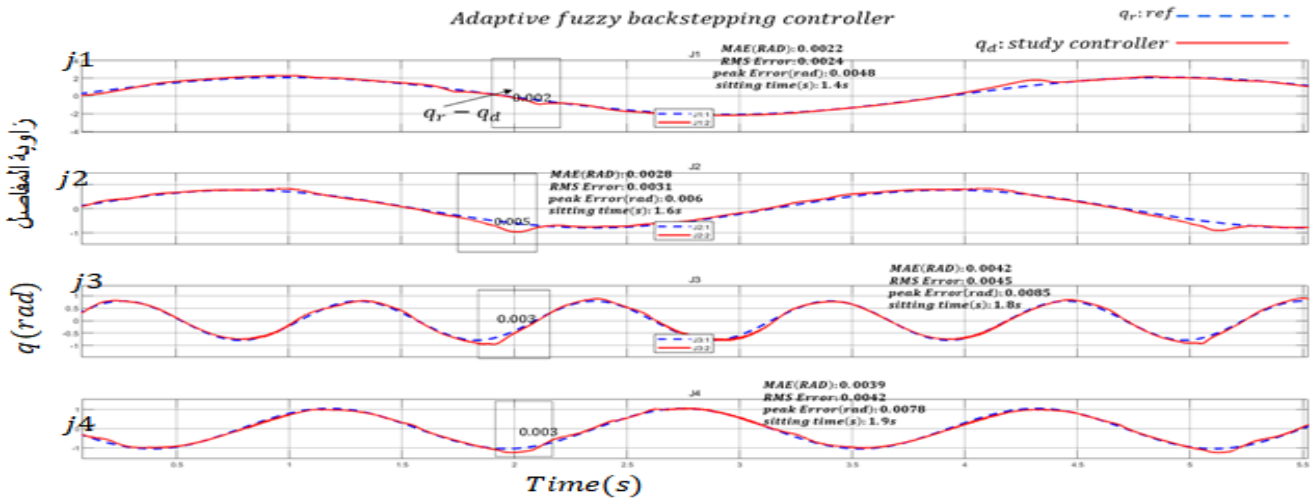


الشكل (8): إشارة مفاصل الذراع الروبوتية مع حمل متغير.

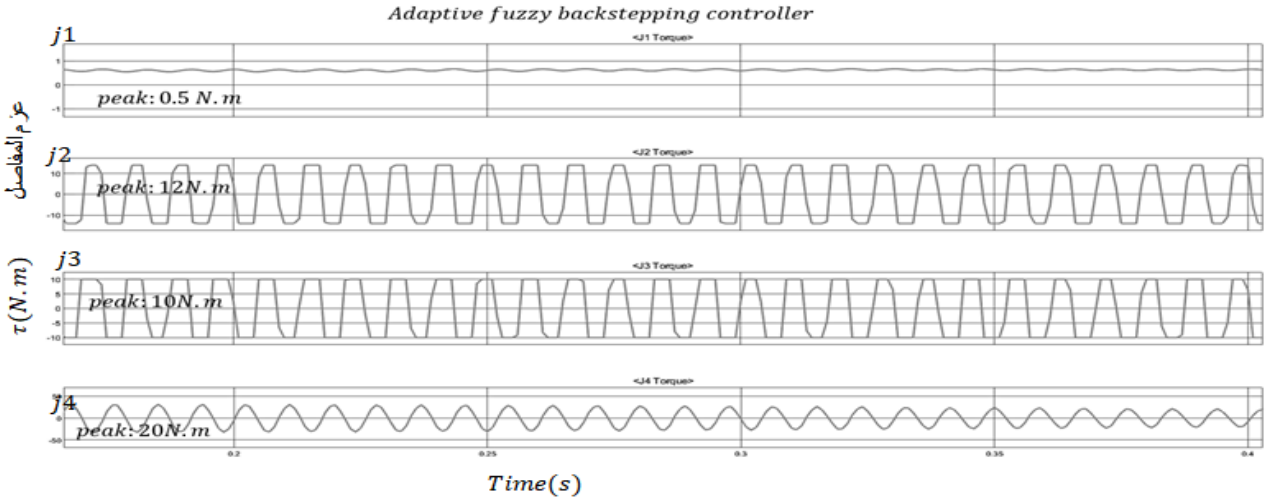


الشكل (9): إشارة العزم لمفاصل الذراع الروبوتية مع حمل متغير.

الاختبار الثالث



الشكل (10): إشارة مفاصل الذراع الروبوتية مع حمل متغير واضطرابات خارجية.



الشكل (11): إشارة العزم لمفاصل الذراع الروبوتية مع حمل متغير واضطرابات خارجية

6. مناقشة النتائج:

تم تحديد مقاييس الأداء (Performance Metrics) التي تسمح لنا بتقييم فعّالية المُتحكّم المدروس عند تطبيقه على الذراع الروبوتية (أو أي نظام ديناميكي آخر):

Overshoot % (نسبة التجاوز)، MAE (متوسط الخطأ المطلق)، RMS error (جذر متوسط مربع الخطأ)، Peak error (أقصى خطأ)، (زمن الاستقرار) sitting time.

الاختبار الأول: يظهر في الشكل (6) أن الإشارة المُقاسة تتبع الإشارة المرجعية بشكل جيد دون تأخير كبير في الطور مع جود اهتزاز خفيف طبيعي والعزم ثابت تقريباً وقيمته صغيرة كما هو واضح في الشكل(7).

إذاً، فالنظام يعمل في حالة مستقرة دون حمل، والمُتحكّم لا يسبب اهتزازات ميكانيكية زائدة في حالة اللاحمل، تظهر مؤشرات الأداء كما هو موضح في الجدول(5).

الاختبار الثاني: تعرضت الذراع الروبوتية لتغير مفاجئ في ديناميكيات النظام نتيجة إضافة حمل متغير بنسبة تصل إلى 30% واضطرابات خارجية غير مؤكده على المفاصل، نلاحظ في الشكل (8) و الشكل (9) أن

استجابات المفاصل الأربعة (J_1, J_2, J_3, J_4) تأثرت بشكل واضح وظهرت تذبذبات في الزوايا خلال مراحل التباطؤ والتسارع بسبب العزم الإضافي الناتج عن الوزن المضاف عند نهاية الذراع، كما نلاحظ أن هناك قفزات أكبر للخطأ للمفاصل الطرفية (J_2, J_3) ثم تهدأ تدريجياً، هذا يدل على استجابة عابرة كبيرة عند إدخال الحمل، بالنسبة لمنحنيات العزم نلاحظ نوبات كبيرة في بداية التغيير حتى يصل النظام إلى التوازن خلال زمن 4sec ليفقد المُتحكّم السيطرة على الإشارة بعد هذا الزمن وتظهر مؤشرات الأداء خلال زمن 4s كما هو موضح في الجدول(2).

الاختبار الثالث بعد إضافة المُتحكّم الضبابي PID التكيفي: يظهر الشكل (10) و الشكل (11) أن لدى المتحكم القدرة على تثبيت المفاصل J_1, J_2, J_3, J_4 مع استجابة ناعمة والنظام مستقر كلياً، لا يوجد overshoot كبيرة فقط اهتزازات صغيرة في بداية الحركة نتيجة المشتقات العالية كما أن الاهتزازات في الحالة المستقرة محدودة جداً، من الممكن التعديل في قاعدة التكيف (Adaptive law) لتخفيف العزم المتذبذب عند المفاصل البعيدة عن القاعدة.

نلاحظ أن الذراع قد حققت تتبع مسار جيد، عدم وجود تجاوزات واضحة وخطأ تتبع منخفض حيث تظهر مؤشرات الأداء لمفاصل الذراع الروبوتية كما هو موضح في الجدول(5).

الجدول(5): مقارنة مؤشرات الأداء للذراع الروبوتية المدروسة

نتائج المحاكاة على الذراع الروبوتية المدروسة						
مؤشرات الأداء	MAE (rad)	RMS Error (rad)	Peak Error (rad)	Sitting time(s)	Overshoot(%)	Torque peak(N.m)
التجربة الأولى						
المفصل الأول j1	0.0028	0.0031	0.006	1.5	0.6%	0.5
المفصل الثاني j2	0.0034	0.0037	0.007	1.7	0.7%	10.3
المفصل الثالث j3	0.0034	0.0043	0.008	1.8	0.8%	10
المفصل الرابع j4	0.0041	0.0046	0.009	1.9	0.9%	20
التجربة الثانية خلال زمن 4s (بعد هذا الزمن يفقد المتحكم السيطرة ومتابعة الإشارة)						
المفصل الأول j1	0.045	0.052	0.09	0.47	9%	2
المفصل الثاني j2	0.041	0.049	0.085	0.49	8.5%	10.2
المفصل الثالث j3	0.052	0.060	0.01	0.5	1%	10
المفصل الرابع j4	0.038	0.045	0.08	0.42	8%	19.8
التجربة الثالثة						
المفصل الأول j1	0.0022	0.0024	0.0048	1.4	0.48%	0.5
المفصل الثاني j2	0.0028	0.0031	0.006	1.6	0.6%	12
المفصل الثالث j3	0.0042	0.0045	0.0085	1.8	0.85%	10
المفصل الرابع j4	0.0039	0.0042	0.0078	1.9	0.78%	20

عند تطبيق حالات عدم اليقين (الأحمال المتغيرة والاضطرابات الخارجية) يزداد العزم المطلوب مؤقتاً ما يؤدي إلى تجاوز أولي قبل أن يتدخل المُتحكّم (adaptive PID fuzzy_ Backstepping) ليعيد الاستقرار ويلاحق الإشارة وهو أداء جيد مقارنة بالمتحكمات التقليدية حيث لم تتجاوز الإشارة 0.85% بالنسبة للتجاوز الأعظمي ودقة التتبع 0.39% والحفاظ على ثبات الأداء الحركي بالنسبة لزمن الاستقرار و0.42% بالنسبة لمتوسط الخطأ المطلق هذا يدل على قدرة المتحكم على التعويض السريع وتحقيق استقرار ديناميكي جيد دون

اهتزازات طويلة، حيث تم التعامل مع تغير في الأحمال بنسبة 60% متفوقا في ذلك على المتحكمات التقليدية بالمقارنة بين القيم الموجودة بنسبة تحسن تتراوح وسطياً للمفاصل الأربعة بين 85% و90% في الجدول(5) حيث تحسب نسبة التحسن% ((القيمة الوسطية لمؤشر الأداء للمفاصل الأربعة المرجعي – القيمة الوسطية لمؤشر الأداء للمفاصل الأربعة المقترح)/ القيمة الوسطية لمؤشر الأداء للمفاصل الأربعة المرجعي)*100).

كما تُظهر المقارنة بين ثوابت وفق الجداول(3) و (4) (المتحكم التعاقبي التقليدي P–PI مع الـ Back Stepping) و(المتحكمadaptive PID fuzzy_ Backstepping المقترح) أن ثوابت التحكم في المتحكم الأول تبقى ثابتة طوال فترة التشغيل مع الحاجة إلى حلقتي تحكم بالموضع والسرعة، مما يجعله غير قادر على التعامل مع التغيرات المفاجئة في الحمل أو الاضطرابات الخارجية، في المقابل يقوم المتحكم التكيفي مع حلقة تحكم واحدة بالموضع بتعديل ثوابت Kp و Ki و Kd بشكل لحظي اعتمادًا على حالة الخطأ ومشتقه حيث تتغير هذه الثوابت تلقائيًا عند زيادة الحمل بنسبة 60% لتصل إلى $K_{Pfinal} = 3.47213, K_{Ifinal} = 0.31029, K_{Dfinal} = 0.18542$ هذا التكيّف الديناميكي مكّن المتحكم من الحفاظ على الاستقرار واستعادة التتبع بسرعة، بينما فشل المتحكم التقليدي في الظروف نفسها.

7.الخاتمة والتوصيات:

أظهرت النتائج المستخلصة من هذه الدراسة أن المتحكم المقترح (الذي يجمع بين منهجية الخطوات الخلفية والمتُحكّم PID الضبابي التكيّفي) قدّم أداءً متوازناً في التتبّع والحفاظ على استقرار استجابة المفاصل سواء في حالة العمل مع حمل متغيّر واضطرابات خارجية.

ففي حالة عدم وجود حمل، تميّز النظام بزمن صعود قصير وخطأ تتبّع منخفض واستقرار مرتفع مع اهتزازات محدودة عند النهاية المؤثرة وذلك عند تطبيق المتحكم دون الجزء الضبابي التكيّفي.

أمّا عند إدخال حمل متغير الكتلة واضطرابات خارجية احتجنا إلى إدخال الجزء الضبابي المتكيّف، للتخلص من خطأ التتبع والتذبذبات الملحوظة في المفاصل الوسطى نتيجة التأثيرات الديناميكية الإضافية، حيث نلاحظ أنّ المتحكم الضبابي التكيّفي تمكّن من استعادة التتبع بسرعة والحفاظ على استقرار النظام ضمن حدود آمنة.

التوصيات والأعمال المستقبلية:

1. توسيع تطبيق المُتحكّم ليشمل نظامًا ثنائي الأذرع يعملان بتزامن فعلي على جسم واحد مشترك لتقييم أداء التحكّم التعاوني.
2. تطبيق النظام عملياً باستخدام لوحات إلكترونية (مثل Raspberry أو Arduino/STM32) للتحقق من الأداء العملي مقارنة بالمحاكاة.

8.المراجع:

1. Chotikunnan, P.; Pititheeraphab, Y. 2023, *Adaptive P control and adaptive fuzzy logic controller with expert system implementation for robotic manipulator application*. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, Vol.4,N. 2, pp 217–226.

2. Liu, H.; Yu, B.; Shan, X.; Yuan, H. 2023, *P-PI controller tuning for multi-axis motion control of hybrid robots*. *In Advances in Mechanism, Machine Science and Engineering in China(Springer)*, pp 1871–1882.

3. Liu, H.; Zhang, Y.; Chen, X. 2020, *Adaptive backstepping sliding mode control of trajectory tracking for robotic manipulators*. *Complexity*, Vol. 2020 ,pp 1-11.

4. Mustafa, M.; Crane, D.; Hamarash, I. 2020, *Dedicated nonlinear control of robot manipulators in the presence of external vibration and uncertain payload*. *Robotics*,Vol.9, N.1,pp 2.

5. Nunes, P.; de Farias, B.; da Fonseca Neto, V.; Costa Filho, T. 2016, *Adaptive PID controllers tuning: LMS gain scheduling training and industrial programmable logic controllers*. *Proceedings of the 8th Brazilian Congress on Neural Networks (CBRN)*, April.

6. Prasetyowati, D.; Arifin, B.; Ardalli, J.; Ismail, M.; Subroto, I.; Purnomo, H. 2021, *Hybrid FLC-LMS algorithm for predicting sediment volume in the river*. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*,Vol.14,N.2,pp 395–409.

7. ROBTS. 2020, *Open MANIPULATOR-X*. Accessed: 15/5/2025.

8. Saka, I.; Unver, S.; Selim, E.; Tatlicioglu, E.; Zergeroglu, E. 2024, *Robust backstepping control of robotic manipulators actuated via brushless DC motors*. *International Journal of Dynamics and Control*, Vol.12,N.11, pp 4110–4119.

9. Spong, M. W.; Hutchinson, S.; Vidyasagar, M. 2020, *Robot Modeling and Control*. 2nd, John Wiley & Sons,419.

10. Tinoco, V.; Silva, F.; Santos, N.; Morais, R.; Magalhães, A.; Oliveira, M. 2025, *A review of advanced controller methodologies for robotic manipulators*. *International Journal of Dynamics and Control(springer)*, Vol.13,N.1,pp13-36.

11. Vaidyanathan, S.; Azar, A. T. 2020, *Backstepping Control of Nonlinear Dynamical Systems*. *Academic Press*. Elsevier ,531.

12. Wan, M.; Liu, Q. 2019, *Adaptive fuzzy backstepping control for uncertain nonlinear systems with tracking error constraints. Advances in Mechanical Engineering*, Vol.11,N.5,pp 1–11.

13. Wei, B. 2018, *Adaptive control design and stability analysis of robotic manipulators. Actuators*, Vol.7,N.4, pp89.

14. Zhang, H.; Li, Y.; Wang, J. 2023, *Adaptive fuzzy command filtered tracking control for flexible robotic arm with input dead-zone. Applied Sciences*, Vol .13,N. 19, pp2-17.

15. Zhou, J.; Liu, E.; Tian, X.; Li, Z. 2022, *Adaptive fuzzy backstepping control based on dynamic surface control for uncertain robotic manipulator*. *IEEE*,Vol. 10,N.1,pp23333-23341.