

Optimized Fuzzy Controller for Controlling a Drilling Robot Using PSO Algorithm

Dr. Olfat Jolaha*
Ahmad Jeblawi**

(Received 22 / 5 / 2022. Accepted 25 / 7 / 2022)

□ ABSTRACT □

The robots use electric motors that are selected according to the type of robot used. In industrial robots, whose motors need to supply more power, we use alternating current motors. As for portable robots, DC motors are used. These motors can be controlled precisely using modern theories of control and optimization.

In this paper, a PSO-Fuzzy-PID (PFP) controller is proposed to control the speed of a continuous motor for a drilling robot. The robotic control system has been simulated using Simulink in the MATLAB environment. The use of the proposed PFP controller eliminates the peak overshoot and obviously improves the settling time.

Keywords: Drilling ROBOT, DC MOTOR, Fuzzy Logic Controller, PSO algorithm, Optimization.

* Associate Professor, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. olfatjolaha@gmail.com

**MSC Student, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. ahmadjeblawi4@gmail.com

أمثلة المتحكم الضبابي للتحكم بروبوت حفر باستخدام خوارزمية PSO

د. ألفت جولحة*

أحمد جبلاوي**

(تاريخ الإيداع 22 / 5 / 2022. قُبِلَ للنشر في 25 / 7 / 2022)

□ ملخص □

تستخدم الروبوتات المحركات الكهربائية التي يتم اختيارها وفقاً لنوع الروبوت المستخدم، ففي الروبوتات الصناعية والتي تحتاج طاقة كبيرة يتم استخدام محركات التيار المتناوب، وفي الروبوتات المحمولة يتم استخدام محركات التيار المستمر. لقد أصبح من الممكن التحكم بكل أنواع المحركات بدقة وتحقيق الاستفادة القصوى منها من خلال استخدام نظريات التحكم الحديثة والأمثلة.

تم في هذا البحث اقتراح متحكم (PFP) PSO-Fuzzy-PID للتحكم بسرعة محرك مستمر خاص بروبوت حفر. وقد تم محاكاة عمل الروبوت مع المتحكم باستخدام برنامج المحاكاة Simulink في بيئة MATLAB. إن استخدام المتحكم PFP المقترح أدى إلى إلغاء قمة التجاوز وتحسين زمن الاستقرار بشكل واضح.

الكلمات المفتاحية: روبوت حفر، محرك التيار المستمر، متحكم ضبابي، خوارزمية PSO، الأمثلة.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

إيميل: olfatjolaha@gmail.com

** طالب ماجستير - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

إيميل: ahmadjeblawi4@gmail.com

مقدمة:

يؤدي تجاوز القيمة المطلوبة (قمة التجاوز) وتجاوز القيد الزمني في بعض نظم التحكم إلى نتائج كارثية قد ينتج عنها انهيار النظام بأكمله أو جزء منه. لهذا فإنه من المهم إلغاء قمة التجاوز وتحسين زمن الاستقرار. وبالنظر لأهمية هذين البارامترين فقد جرت أبحاث كثيرة لتحسينها منها ما استخدم متحكماً ضبابياً للتحكم بمؤشر الخطورة لمنع تصادم السفن ولكنه لم يستطع منع التصادم في حال كانت السفن قريبة جداً من بعضها بسبب وجود قمة التجاوز [1]، وكذلك استخدم المتحكم الضبابي للتحكم بروبوت يسير على سطح أملس ومنع انزلاقه ولم يستطع التغلب على قمة التجاوز أيضاً [2]، ولتحديد مسار ذراع حفار آلي [3]، كما تم أمثلة المتحكم الضبابي باستخدام خوارزمية PSO لتحسين أداء المتحكم الضبابي الذي يتحكم بنظام تنبؤي تمكن هذا المتحكم من تخفيض قمة التجاوز ولكنه لم يستطع إلغاؤها [4]، وفي [5] تمت المقارنة بين أداء المتحكم PID والمتحكم الضبابي وتم التوصل إلى أن المتحكم الضبابي هو الأفضل مع وجود خطأ أصغري. إلا أن هذه المتحكمات قامت بإلغاء خطأ الحالة الدائمة والتحسين على زمن الاستقرار ولكنها لم تستطع إلغاء قمة التجاوز. يتم في هذا البحث التحكم بروبوت حفر باستخدام متحكم ضبابي أمثلي باستخدام خوارزمية PSO يولف ثوابت المتحكم PID بحيث يلغي قمة التجاوز ويخفض زمن الاستقرار وبالتالي يسرع عمل نظام الروبوت.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في زيادة موثوقية نظام التحكم عن طريق التقليل من أثر الحالة العابرة على أداء نظام التحكم من خلال تقديم دراسة تحليلية شاملة من أجل مقارنة تقييم أداء بعض المتحكمات المستخدمة سابقاً (PID, Fuzzy-PID) مع المتحكم المقترح (PSO-Fuzzy-PID)، بهدف الوصول إلى تحديد المتحكم الأفضل. تتم مقارنة أداء المتحكمات وفقاً لمجموعة من البارامترات المختارة التي تلعب دوراً أساسياً في تقييم أداء نظم التحكم، وهذه البارامترات هي: التجاوز الأعظمي (قمة التجاوز) Overshoot وزمن الارتفاع Rise Time وخطأ الحالة الثابتة Steady State Error. تمت نمذجة ومحاكاة نظام التحكم بذراع روبوت الحفر باستخدام برنامج SIMULINK\MATLAB.

طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث تحليل وتصميم المتحكمات PID, Fuzzy-PID بالإضافة إلى المتحكم PSO-Fuzzy-PID (PFP) المقترح ودراسة أداء نظام التحكم المقترح بالمقارنة مع المتحكمات الأخرى. يتكون النظام المقترح للتحكم بذراع روبوت الحفر المبين في الشكل (1) من المتحكم (حيث تم في هذا البحث استخدام ثلاث أنواع من المتحكمات والتي تم ذكرها سابقاً) والذي هو الوحدة الأساسية في هذا النظام حيث أن دخله هو إشارة الخطأ الناتجة عن طرح إشارة خرج النظام (السرعة الزاوية الفعلية) من إشارة الدخل (السرعة الزاوية المطلوبة)، يقوم المتحكم بمعالجة إشارة الخطأ المدخلة له ثم يقوم بإرسال إشارة تحكم للمحرك الموجود ضمن ذراع الروبوت.



الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام التحكم بذراع روبوت الحفر المقترح

يعطى النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر المستخدم ضمن ذراع روبوت الحفر في فضاء الحالة بالعلاقات [6]:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = -\frac{B}{J}x_1(t) + \frac{K_t}{J}x_2(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = -\frac{K_m}{L_m}x_1(t) - \frac{R_m}{L_m}x_2(t) + \frac{1}{L_m}e_a \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) = x_1(t) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \frac{dx_2(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{K_t}{J} \\ -\frac{K_m}{L_m} & -\frac{R_m}{L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_m} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

لمعادلات فضاء الحالة هذه الشكل القياسي الموضح أدناه [6]:

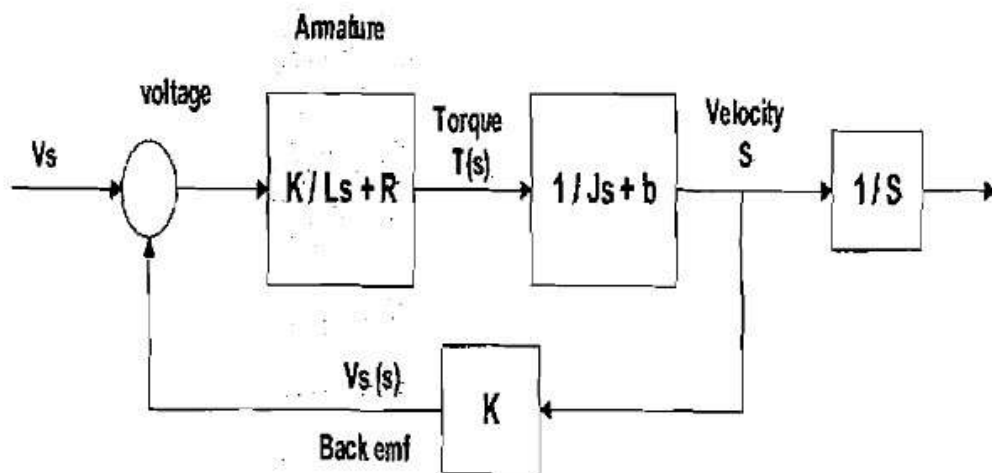
$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} (6)$$

حيث أن:

B : ثابت التهييج المغناطيسي، J : ثابت العطالة، K_m : الثابت الكهربائي للآلة،

K_t : الثابت الميكانيكي للآلة، L_m : قيمة التحريض في دائرة التهييج، R_m : قيمة المقاومة في دائرة التهييج

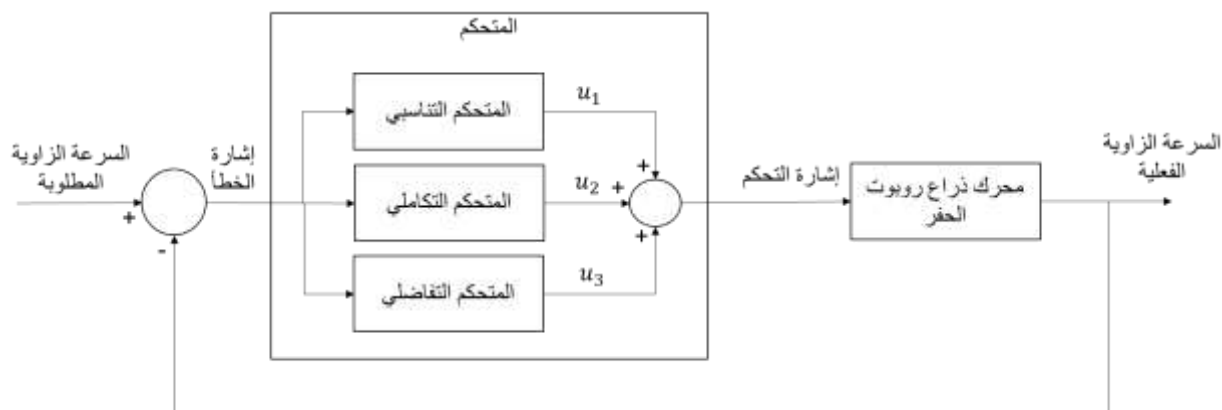
يظهر الشكل (2) المخطط الصندوقي لمحرك التيار المستمر المستخدم في ذراع روبوت الحفر والذي يتكون من المغناطيس ومقاومة الهيكل والفرشاة الكربونية المحول بالإضافة إلى مصدر الطاقة ذو التيار المستمر والذي يشكل دخل المحرك.



الشكل (2) المخطط الصندوقي للمحرك DC [6]

1. توليف المتحكم PID

يتألف المتحكم PID من مفاضل ومكامل ورياح، يهدف إلى التعديل على إشارة التحكم بطريقة خطية ، حيث تحتاج بيئة المعالجة الرياضية الخطية إلى بعض التعديل ال خطي وانحرافات معيارية في اتجاه المنحني البياني للتابع الرياضي، لذلك يتم اللجوء إلى هذا النوع من المتحكمات البسيطة لإجراء تعديلات مهمة في إزاحة مطال الإشارة وزيادة الريح في الخرج. ويفضل استخدامه برمجيا مع جميع أنواع المتحكمات الأخرى نظرا لكفائه وقدرته على التعديل الخطي الضروري للإشارات حسب الحاجة إليها. يوضح الشكل (3) المخطط الصندوقي للمتكم PID حيث تم اختيار الربط التفرعي للمتكمات التناسبي والتكاملي والتفاضلي.



الشكل (3) المخطط الصندوقي للمتكم PID

معادلات المتكم PID [38]:

$$u_1(t) = k_p e(t)$$

معادلة المتكم التناسبي:

$$u_2(t) = k_i \int_0^t e(T) dT$$

معادلة المتكم التكاملي:

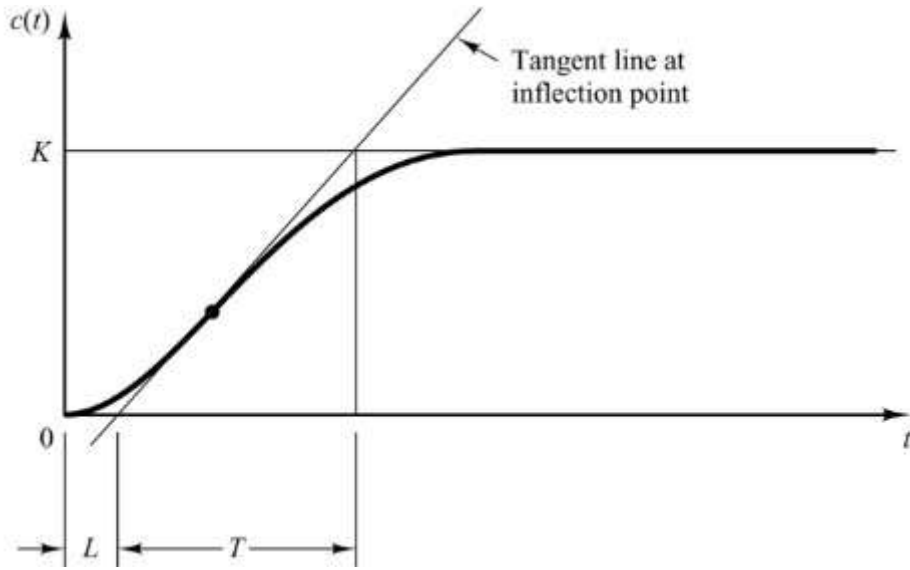
$$u_3(t) = k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

معادلة المتكم التفاضلي:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(T) dT + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

معادلة المتكم النهائية :

حيث أن: k_p : ثابت التناسب، k_i : ثابت التكمال، k_d : ثابت التفاضل، u : إشارة التكم، e : إشارة الخطأ تم في هذا البحث اختيار طريقة Ziegler and Nichols لتوليف المتكم PID حيث أجرى الباحثان Ziegler و Nichols العديد من التجارب واقتروا قواعد لتحديد قيم الثوابت k_p, k_i, k_d على أساس استجابة الخطوة العابرة لنظام التكم. يبين الشكل (4) إستجابة نظام تكم حيث أن هذا المنحني يتميز بثابتين هما زمن التأخير L وزمن ثابت T هو الزمن من بدء استجابة النظام الى نقطة تقاطع خط Set Point مع خط Tangent في نقطة انعكاس الاستجابة.



الشكل (4) استجابة نظام تحكم [38]

تُعطى ثوابت المتحكم PID حسب طريقة زيغلر نيكول بالعلاقات التالية:

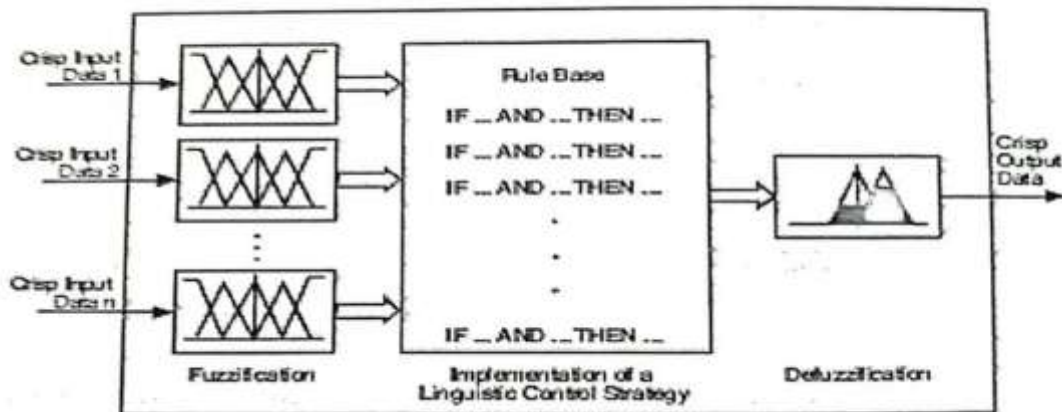
$$k_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad (7)$$

$$k_i = \frac{k_p}{T_i}, \quad T_i = 2L \quad (8)$$

$$k_d = k_p T_d, \quad T_d = 0.5L \quad (9)$$

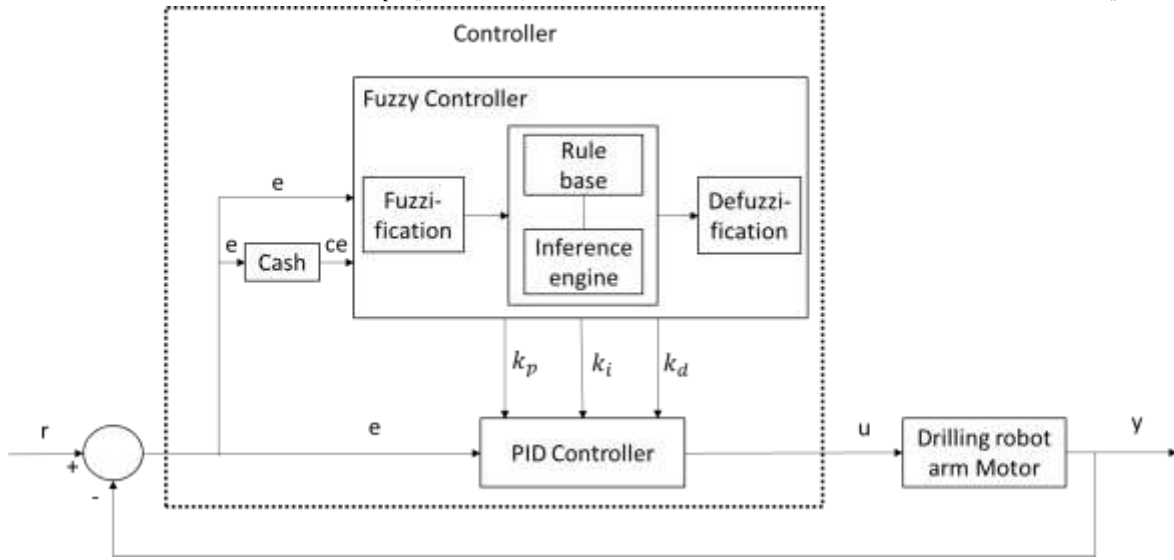
2. تصميم المتحكم الضبابي Fuzzy controller

يهدف استخدام المتحكم الضبابي للوصول إلى حل لمشاكل رياضية أكثر تعقيداً وغير قابلة للحل بالطرق التقليدية البسيطة المنطقية، وذلك للوصول إلى حلول ضبابية بين (0) و (1) تتيح نتيجة أفضل للمشكلة المطروحة. يبين الشكل (5) طريقة عمل المتحكم الضبابي حيث يقوم بتضبيب المداخل Fuzzyfication ثم اختيار القاعدة المناسبة وفقاً لقيم المداخل لتنفيذها ثم تتم عملية فك التضبيب Defuzzyfication للحصول على قيم واضحة Crisp.



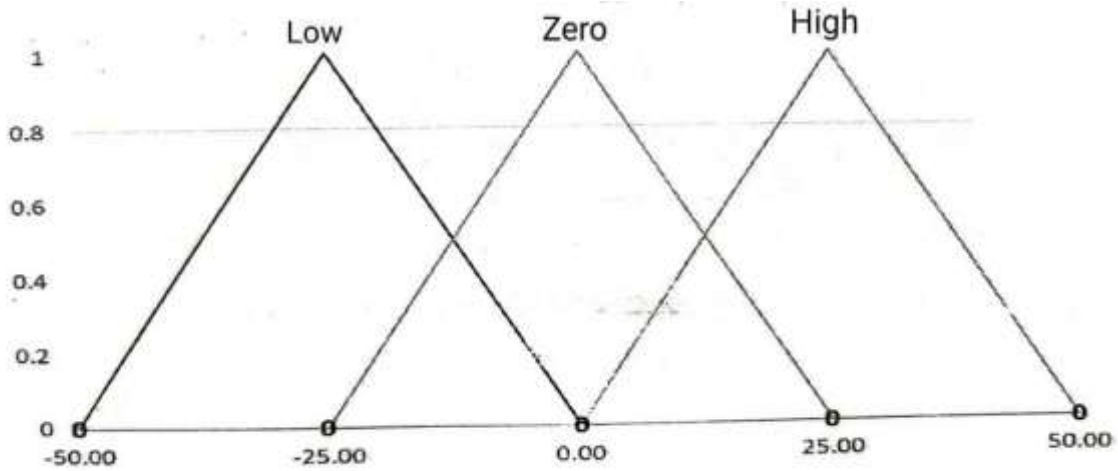
الشكل (5) وحدة المعالجة في المتحكم الضبابي [8]

يبين الشكل (6) المخطط الصندوقي للمتحكم الضبابي الذي يقوم بضبط بارامترات المتحكم PID ويكون دخل المتحكم الضبابي هو الخطأ e والتغير بالخطأ ce وخرجه قيم ثوابت المتحكم PID وهي K_p و K_i و K_d .



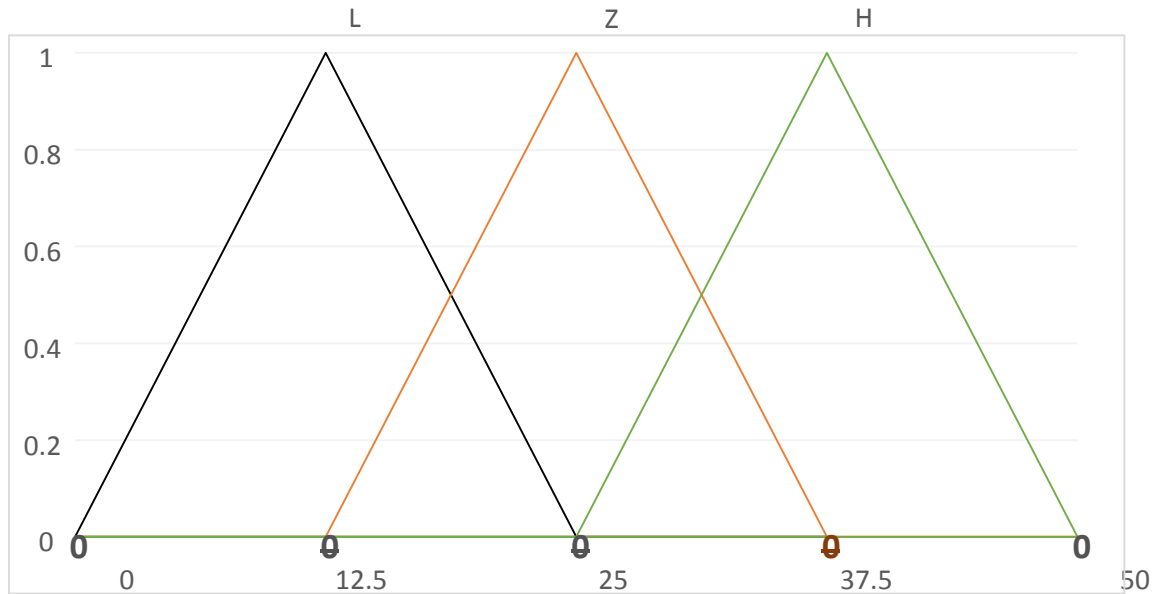
الشكل (6) المخطط الصندوقي للمتحكم Fuzzy-PID

يبين الشكل (7) توابع العضوية لمتغيرات الدخل (إشارة الخطأ e وإشارة التغير بالخطأ ce) للمتحكم الضبابي حيث أن التابع الأول Low مجاله $[-50,0]$ والثاني Zero مجاله $[-25,25]$ والثالث High مجاله $[0,50]$.



الشكل (7) توابع العضوية للدخل ومجالاتها

أما توابع العضوية لخرج للمتحكم الضبابي هي ثلاث توابع L, Z, H مجالاتها $L[0,25]$, $Z[12.5,37.5]$, $H[25,50]$ ضمن المجال الكلي $[0,50]$ وموضحة بالشكل (8).



الشكل (8) توابع العضوية للخروج ومجالاتها
يبين الجدول (1) جدول FAM الذي من خلاله يمكن صياغة القواعد الضبابية.

الجدول (1) جدول FAM للقواعد الضبابية:

ce \ e	Low	Zero	High
Low	Z	L	L
Zero	H	Z	H
High	L	L	Z

من خلال الجدول السابق يمكن قراءة القواعد الضبابية والتي عددها 9 قواعد بالشكل التالي:

- 1) If e is Low and ce is Low then y is Z
- 2) If e is Low and ce is Zero then y is L
- 3) If e is Low and ce is High then y is L
- 4) If e is Zero and ce is Low then y is H
- 5) If e is Zero and ce is Zero then y is Z
- 6) If e is Zero and ce is High then y is H
- 7) If e is High and ce is Low then y is L
- 8) If e is High and ce is Zero then y is L
- 9) If e is High and ce is High then y is Z

3. تصميم المتحكم PID – fuzzy-PSO المقترح

إن خوارزمية PSO هي تمثيل لطريقة أسراب الطيور في البحث عن الطعام حيث تتوزع عناصر السرب (التي يتم تحديد عددها في بداية تنفيذ الخوارزمية) بشكل عشوائي ضمن المجال المحدد أيضاً في بداية التنفيذ. إن كل عنصر

في السرب يشكل حل للمشكلة المطروحة ويتم تطبيق جميع الحلول على المشكلة المطروحة لمعرفة أفضل حل بينها حيث يسمى ب Global best ثم يتم حساب تغير السرعة لكل عنصر حسب المعادلة (10) ويتم تغيير موضع كل عنصر حسب المعادلة (11) ثم يتم حساب Global best من جديد وحساب Local best وهو أفضل موضع (حل) اتخذته العنصر نفسه وهكذا حتى نهاية عدد التكرارات المحددة.

معادلة تغيير السرعة [4]:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 \text{rand}_1 \times (pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2 \times (gbest_i - s_i^k) \quad (10)$$

حيث أن:

V_i^k : تغير سرعة العنصر i في التكرار k .

w : وزن التابع.

C : ثابت الوزن.

rand_i : عدد عشوائي بين 0 و 1.

$pbest_i$: أفضل موقع للعنصر i .

s_i^k : الموضع الحالي للعنصر i في التكرار k .

$gbest_i$: أفضل عنصر بين العناصر.

معادلة تغير الموضع [4]:

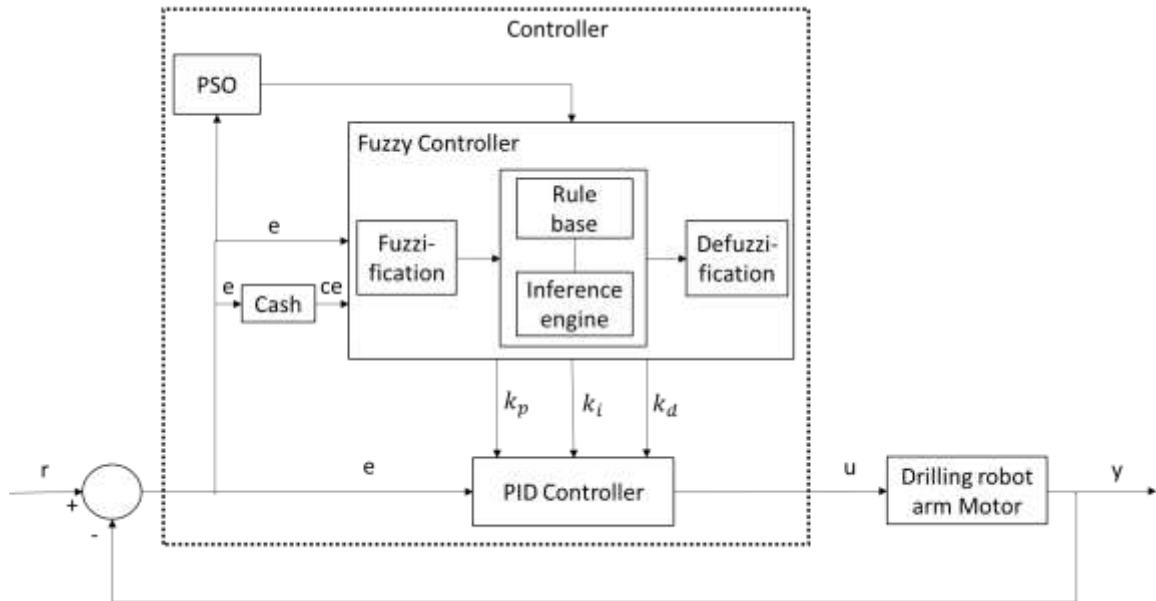
$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

حيث أن:

s_i^k, s_i^{k+1} : الموضع الحالي للعنصر i في التكرار k والموضع الجديد في التكرار $k+1$.

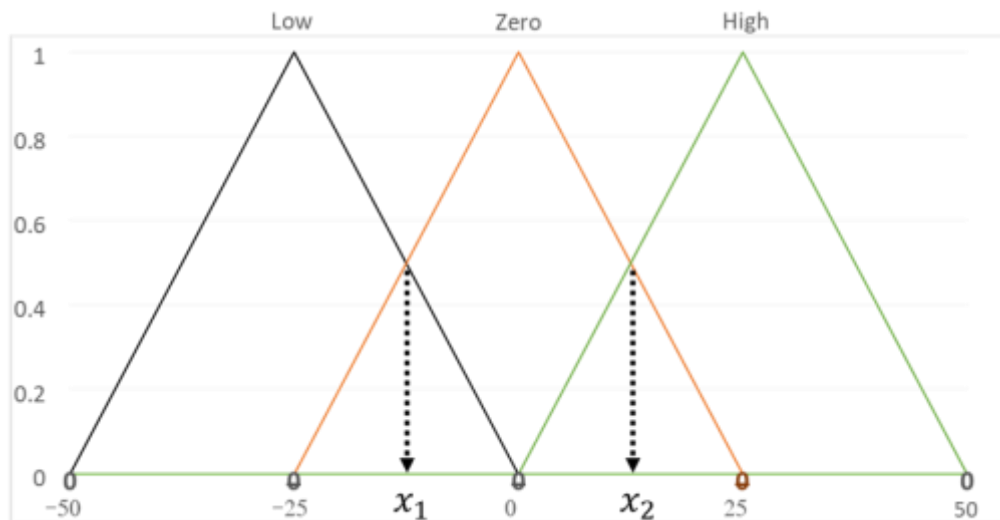
V_i^{k+1} : السرعة الجديدة

تم في هذا البحث استخدام خوارزمية الأمثل Particle Swarm Optimization (PSO) لتعديل مجالات توابع العضوية لدخل المتحكم الضبابي للوصول إلى أفضل استجابة لنظام التحكم بذراع روبوت الحفر حيث أن دخل خوارزمية الأمثلة هو إشارة الخطأ وخرجها مجالات توابع العضوية للمتحكم الضبابي الذي بدوره يعطي الثوابت التناسبي والتفاضلي والتكاملي للمتحكم PID ليعطي إشارة التحكم لمحرك ذراع الروبوت ويوضح الشكل (9) المخطط الصندوقي للمتحكم PSO-Fuzzy-PID المقترح.



الشكل (9) المخطط الصندوقي للمتحكم PFP المقترح

يتم الملاحظة من الشكل السابق أن دخل خوارزمية PSO هو إشارة الخطأ التي تبين للخوارزمية مدى إقتراب الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) من الدخل (السرعة الزاوية المطلوبة) حيث أن الخوارزمية تقوم على مجموعة من العناصر Particles يتم تحديد عددها في بداية التنفيذ ويشكل كل عنصر حل حيث يحتوي كل عنصر على قيمتين x_1, x_2 هي نقاط تقاطع توابع العضوية لدخل المتحكم الضبابي حيث أنه بتغيير مواقع هذه النقاط يتغير مجال كل من توابع العضوية الثلاث حيث أن النقاط المجاورة لنقطة التقاطع ستتغير بالتناسب مع موقع نقطة التقاطع الجديد وبذلك تتشكل ثلاث مجالات لتوابع العضوية يتم إعطاؤها للمتحكم الضبابي، أي أن كل عنصر في خوارزمية PSO يعطي مجالات جديدة للتوابع الأعضاء للمتحكم الضبابي يتم التنفيذ من خلالها، يوضح الشكل (10) نقاط التقاطع لتوابع العضوية.



الشكل (10) نقاط تقاطع توابع الانتماء لإشارة الخطأ e والتغير بالخطأ ce

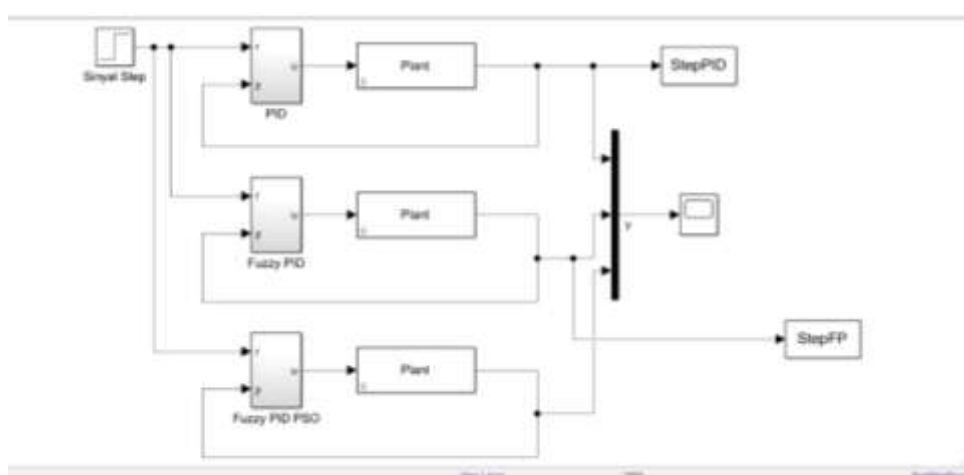
النتائج والمناقشة:

تم في هذا البحث تصميم المتحكم المقترح PSO-Fuzzy-PID ومقارنة أدائه مع المتحكم PID المبين في الشكل (3) والمتحكم Fuzzy-PID المبين في الشكل (6) واستخدمت بيئة MATLAB\SIMULINK لنمذجة ومحاكاة نظام التحكم بروبوت الحفر حيث أن دخل النظام هو السرعة الزاوية المطلوبة وخرجه السرعة الزاوية الفعلية لمحرك التيار المستمر المشغل لذراع روبوت الحفر.

تم اختبار نظام التحكم بروبوت الحفر المقترح وفق بارامترات المحرك الموضحة في الجدول (2) وقواعد المتحكم الضبابي المبينة في الجدول (1) وتوابع العضوية للدخل المبينة في الشكل (7) وتوابع العضوية للخروج المبينة في الشكل (8) ويظهر الشكل (11) المخطط الصندوقي المعبر عن الأنظمة والتي تم استخدامها في بيئة / MATLAB .SIMULINK

الجدول (2) بارامترات المحرك المستمر المستخدم في ذراع روبوت الحفر [6]:

البارامتر	القيمة
ثابت العزم	$T_s = 0.01 \text{ N.m}$
ثابت العطالة	$J = 0.01 \text{ kg.m}^2$
ثابت دائرة التهييج المغناطيسي	$b = 0.1$
الثابت الكهربائي للآلة	$K_e = 0.01$
الثابت الميكانيكي للآلة	$K_t = 0.01$
قيمة المقاومة في دائرة التهييج	$R = 1 \Omega$
قيمة التحريض في دائرة التهييج	$L = 0.5 \text{ H}$



الشكل (11) المخطط الصندوقي لأنظمة التحكم المدروسة في واجهة MATLAB\SIMULINK

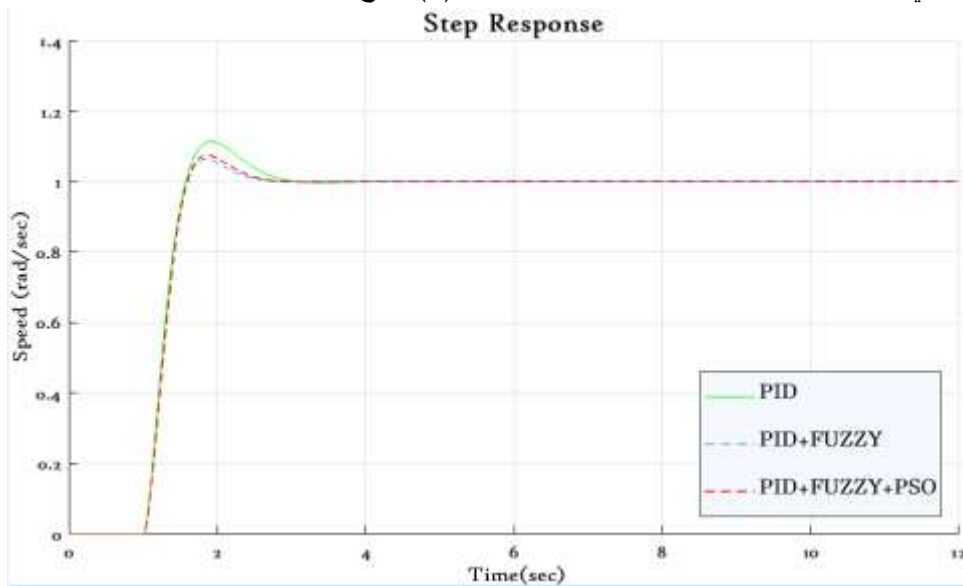
تم اختبار نظام التحكم بروبوت الحفر المقترح وفق ثلاث سيناريوهات مختلفة حيث أنه في السيناريو الأول تم اختبار النظام بعدد عناصر 10 وعدد تكرارات 5 لخوارزمية PSO، وفي السيناريو الثاني تم اختبار نظام التحكم بالروبوت

بعدد عناصر 20 وعدد تكرارات 10 لخوارزمية PSO، أما في السيناريو الثالث فتم الاختبار بعدد عناصر 30 وعدد تكرارات 20 لخوارزمية PSO.

• السيناريو الأول:

يتم اختيار النظام في هذا السيناريو بعدد عناصر Particles num=10 وتكرارات Iteration=5 لخوارزمية PSO التي تم استخدامها في المتحكم PSO-Fuzzy-PID المقترح:

يظهر الشكل (12) إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) لمحرك ذراع روبوت الحفر المقترح في حالة استخدام كل من المتحكمات PID و Fuzzy-PID و PSO-Fuzzy-PID حيث أن المتحكم PID الذي يتم ضبطه باستخدام المتحكم الضبابي أظهر أقل قيمة لقمّة التجاوز ويظهر الجدول (3) نتائج هذا السيناريو.



الشكل (12) إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) للنظام المقترح وفق السيناريو الأول

الجدول (3) تقييم أداء نظام التحكم بروبوت الحفر المقترح مع المتحكمات الأخرى وفق السيناريو الأول:

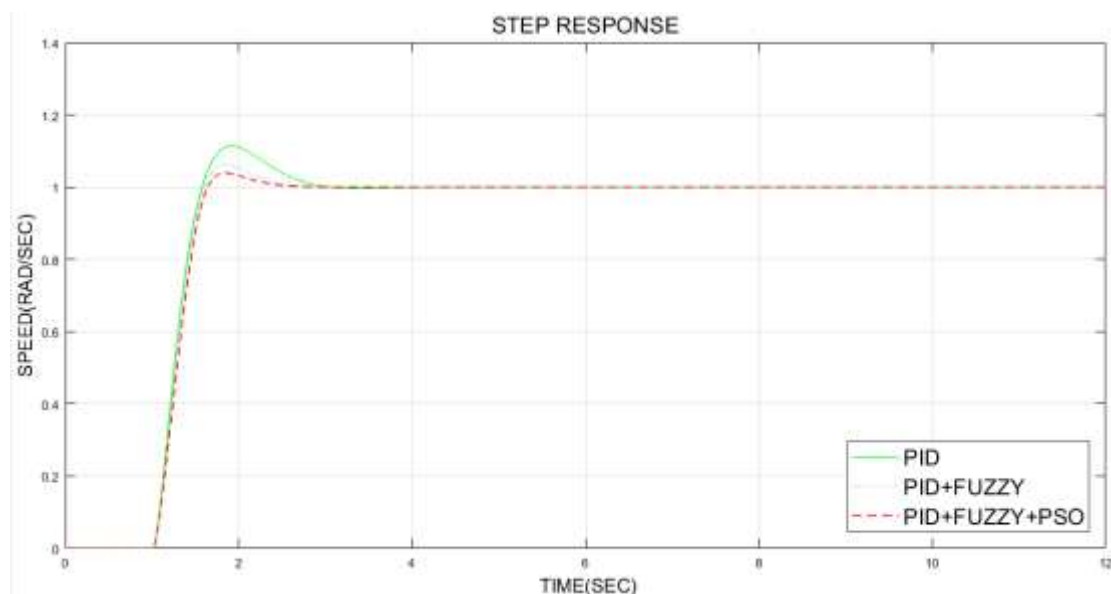
المتحكمات والسيناريوهات	قمة التجاوز %	زمن الصعود [Sec]	زمن الاستقرار [Sec]
PID	12.94	1.489	2.934
Fuzzy-PID	5.87	1.494	2.656
PSO-Fuzzy-PID	6.53	1.497	2.682

الجدول (4) قيم البارامترات k_p, k_i, k_d الناتجة عن المتحكمات المستخدمة وفق السيناريو الأول:

المتحكم	k_p	k_i	k_d
PID	7.923	8.065	1.978
Fuzzy-PID	5.334	3.507	2.849
PSO-Fuzzy-PID	5.562	4.821	2.274

- السيناريو الثاني:

يتضمن هذا السيناريو عدد عناصر $Particles\ num=20$ مع تكرارات $Iteration=10$ لخوارزمية PSO: بمقارنة إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) للمتحكم PSO-Fuzzy-PID المقترح والمتحكمات PID و Fuzzy-PID في الشكل (13) يتم استنتاج أن المتحكم PFP المقترح أظهر أقل قيمة لقمّة التجاوز كما أظهر زمن استقرار أقل من المتحكمات المقارن معها ويظهر الجدول (4) نتائج هذا السيناريو.



الشكل (13) إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) للنظام المقترح وفق السيناريو الثاني

الجدول (5) تقييم أداء نظام التحكم بروبوت الحفر المقترح مع المتحكمات الأخرى وفق السيناريو الثاني

المتحكمات والسيناريوهات	قيمة التجاوز %	زمن الصعود [Sec]	زمن الاستقرار [Sec]
PID	12.94	1.489	2.934
Fuzzy-PID	5.87	1.494	2.656
PSO-Fuzzy-PID	4.36	1.524	2.653

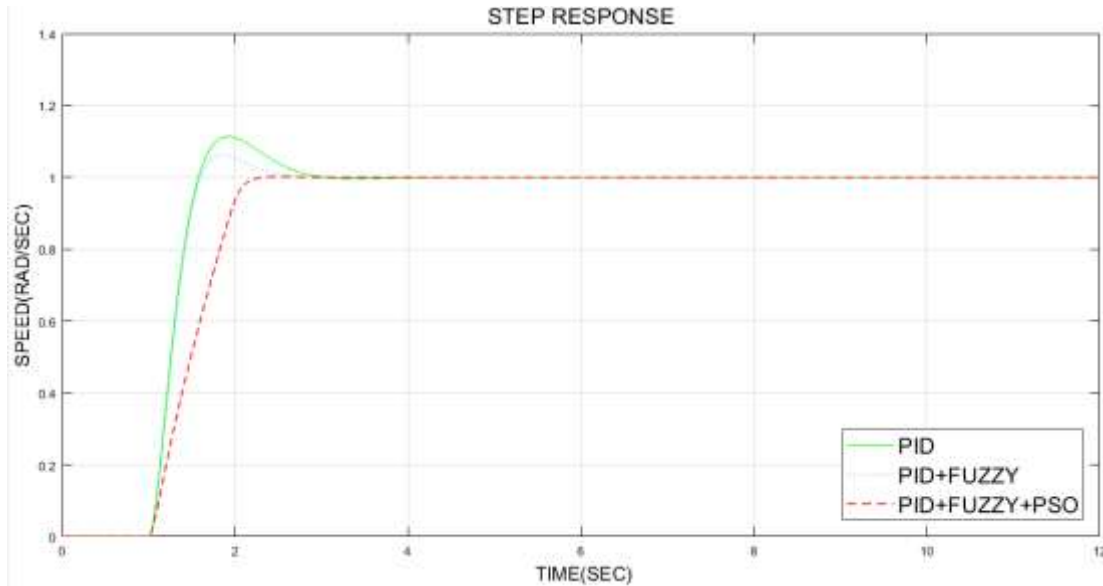
الجدول (6) قيم البارامترات k_p, k_i, k_d الناتجة عن المتحكمات المستخدمة وفق السيناريو الثاني:

المتحكم	k_p	k_i	k_d
PID	7.923	8.065	1.978
Fuzzy-PID	5.334	3.507	2.849
PSO-Fuzzy-PID	3.501	1.430	3.025

- السيناريو الثالث:

يتم في هذا السيناريو اختبار نظام التحكم بذراع روبوت الحفر بعدد عناصر $Particles\ num=30$ وتكرارات $Iteration=20$ لخوارزمية الأمثلة PSO:

يظهر الشكل (14) إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) لمحرك ذراع روبوت الحفر المقترح في حالة إستخدام كل من المتحكمات PID و Fuzzy-PID و PSO-Fuzzy-PID حيث أن المتحكم PFP المقترح استطاع إلغاء قمة التجاوز بشكل كامل كما أظهر زمن استقرار أقل من المتحكمات المقارن معها وبالتالي سرعة استجابة أكبر ويظهر الجدول (5) نتائج هذا السيناريو .



الشكل (14) إشارة الخرج (السرعة الزاوية الفعلية) للنظام المقترح وفق السيناريو الثالث

الجدول (7) تقييم أداء نظام التحكم بروبوت الحفر المقترح مع المتحكمات الأخرى وفق السيناريو الثالث

المتحكمات والسيناريوهات	قمة التجاوز%	زمن الصعود [Sec]	زمن الاستقرار [Sec]
PID	12.94	1.489	2.934
Fuzzy-PID	5.87	1.494	2.656
PSO-Fuzzy-PID	≈ 0	2.251	2.351

الجدول (8) قيم البارامترات k_p, k_i, k_d الناتجة عن المتحكمات المستخدمة وفق السيناريو الثالث:

المتحكم	k_p	k_i	k_d
PID	7.923	8.065	1.978
Fuzzy-PID	5.334	3.507	2.849
PSO-Fuzzy-PID	1.913	0.308	5.532

مناقشة النتائج:

تظهر نتائج السيناريو الأول في الجدول (3) أن المتحكم Fuzzy-PID أعطى أفضل نتيجة حيث أن خطأ الحالة الدائمة صفري وقمة تجاوز (5.87%) أقل من المتحكمات PSO-Fuzzy-PID المقترح وPID، ولكن بزيادة عدد عناصر وتكرارات خوارزمية الأمثلة PSO أظهر المتحكم PSO-Fuzzy-PID المقترح تحسن في الاستجابة في السيناريو الثاني حيث أن قمة التجاوز انخفضت إلى (4.36%) كما هو موضح في الجدول (4)، وفي السيناريو الثالث استطاع المتحكم المقترح أن يصل إلى قمة تجاوز صفرية وزمن استقرار 2.351 ثانية كما هو موضح في الجدول (5) وبذلك تفوق على المتحكمات المقارن معها بشكل كامل.

الاستنتاجات والتوصيات:**الاستنتاجات:**

- حسن المتحكم المقترح PSO-Fuzzy-PID من استجابة نظام التحكم في الحالة العابرة عن طريق إلغاء قمة التجاوز مقارنة مع الطرق الأخرى (PID, Fuzzy-PID)، مما يؤدي إلى عمل نظام التحكم ضمن القيم الاسمية المسموح بها وبالتالي يزيد من كفاءة وفعالية نظام التحكم ويحافظ على العناصر المادية المكونة له.
- خفض المتحكم المقترح PSO-Fuzzy-PID من زمن الاستقرار، وبالتالي زادت من سرعة استجابة نظام التحكم بذراع روبوت الحفر.
- زاد المتحكم المقترح PSO-Fuzzy-PID من زمن الارتفاع بنسبة بسيطة مقارنة مع الطرق الأخرى، ولكنها لا تؤثر على الأداء مقابل التحسين الذي تم على بارامترتي زمن الاستقرار وقمة التجاوز.
- حافظ المتحكم المقترح PSO-Fuzzy-PID على خطأ الحالة الدائمة الصفري كما هو الحال في الطرق الأخرى (PID, Fuzzy PID)، وبالتالي لم يتأثر الأداء بشكل سلبي.
- أثبت المحرك المدروس الأمثلي كفاءة وفعالية عالية وأدى إلى إلغاء خطأ الحالة الدائمة وقمة التجاوز وأصبح ذراع الروبوت بذلك مهياً لعمليات حفر دقيق كما في أجهزة التنقيب الآلي CNC.

التوصيات:

- تغيير بارامترات المحركات المستخدمة في السيناريوهات، أي تطبيق الطريقة المقترحة على مجموعات أخرى من المحركات التي تختلف بخصائصها الكهربائية والميكانيكية.
- زيادة عدد التكرارات في خوارزمية الـ PSO وزيادة عدد الجسيمات Particles، ودراسة أثر ذلك على أداء الطريقة المقترحة.
- تطبيق خوارزمية الأمثلة PSO من أجل اختيار عدد أمثلي للتوابع الأعضاء Member Functions في المتحكم الضبابي.

References:

1. Oulfat Jolaha, Jabr Hanna, Qousay Benshi, "Design of Fuzzy Collision Avoidance System Using Target Hazard Indicator", Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies – Engineering Sciences Series Vol. (14) No. (4) 9142. (2019).
2. S. Khesrani,"Motion Planning and control of nonholonomic mobile robot using flatness and fuzzy logic concepts", International Journal of Dynamics and Control Volume 9, pages 1660-1671 (2021).
3. Nga Thi-Thuy Vu,"Path Planning for Excavator Arm: Fuzzy Logic Control Approach" School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam,(2020).
4. Juan A. Rojas, " Design and Optimization of a Fuzzy Logic System for Academic Performance Prediction", DOI,(2021).
5. Zain-Aldeen S. A.Rahman, "Design a Fuzzy Logic Controller for Controlling Position of DC Motor",Dept of Electrical Techniques, Technical Institute / Qurna, Southern Technical University, Basra, Iraq ,(2017).
6. Harshavardhana REDDY, "Hybrid Adaptive Neuro Fuzzy Based Speed Controller for Brushless DC Motor", School of Electrical Engineering, VIT University, Vellore, India, (2017).
7. G. Eappen and T. Shankar, "Optimization of Two Area AGC Based Trained SSSC and TCPS ", Int. J. Eng. Technol, Vol. 7, PP. 163-168, (2018).
8. M. J. Mahmoodabadi, "Trajectory Tracking of a Flexible Robot Manipulator by a New Optimized Fuzzy Adaptive Sliding Mode-Based Feedback Linearization Controller", Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran, (2020).