

الضبط الأمثل لبارامترات المتحكم PID المستخدم في نظام التحكم بسرعة محرك التيار المستمر بالاعتماد على الخوارزميتين PSO وACO

* أ.د.م. مخائيل سليم مخول

** م. ماري ميشيل البهليط

(تاريخ الإيداع 2021/ 8/ 2 . قُبِلَ للنشر في 2022/ 1/ 10)

□ ملخص □

تُعدُّ تقنيات ذكاء الأسراب إحدى التقنيات الحديثة في مجال الذكاء الصناعي التي تعتمد على محاكاة السلوك الاجتماعي الجماعي لأسراب الطيور أو الأسماك أو النحل وغيرها من الحيوانات الاجتماعية. لقد قمنا في هذا البحث باستخدام خوارزميتين هما خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب (Particle Swarm Optimization, PSO) وخوارزمية إيجاد الحل الأمثل لمستعمرات النمل (Ant Colony Optimization, ACO)، من أجل ضبط بارامترات المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (Proportional Integral Derivative, PID). ثم قمنا باختبار أداء هاتين الخوارزميتين وإجراء مقارنة بينهما من خلال نمذجة نظام التحكم بسرعة محرك تيار مستمر باستخدام بيئة ماتلاب/سيمبوليك. لقد اعتمدنا من أجل إجراء المقارنة على مؤشرات الأداء المعتمدة في تقييم أداء أنظمة التحكم وهي المؤشرات التي تعتمد على قيمة الخطأ المحسوب من الفرق بين قيمة الضبط المرغوبة للاستجابة وبين قيمة استجابة خرج نظام التحكم. حيث اخترنا مؤشرين هما تكامل جداء الزمن في مربع الخطأ (Integral of time multiplied Square Error, ITSE)، وتكامل جداء الزمن في الخطأ المطلق (Integral of Time multiplied Absolute Error, ITAE). واعتمدنا على هذين المؤشرين كتابع ملاءمة للخوارزميتين.

لقد أظهرت النتائج تفوق خوارزمية PSO على خوارزمية ACO في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID عند استخدامه في عملية التحكم بسرعة محرك تيار مستمر. حيث أعطت خوارزمية PSO استجابة أسرع بشكل ملحوظ من خوارزمية ACO. بينما ألغت كلتا الخوارزميتين التجاوز الأعظمي وخطأ الحالة الثابتة لاستجابة خرج نظام التحكم، وهي من المؤشرات المهمة على جودة أداء نظام التحكم.

الكلمات المفتاحية: المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي، ذكاء الأسراب، إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب، إيجاد الحل الأمثل لمستعمرات النمل، محرك تيار مستمر.

* أستاذ في جامعة طرطوس - كلية الهندسة التقنية - قسم هندسة الأتمتة الصناعية.

** طالبة ماجستير جامعة طرطوس - كلية الهندسة التقنية - قسم هندسة الأتمتة الصناعية.

Optimal Tuning of PID controller used in DC motor speed control system using PSO and ACO algorithms

Prof.Eng. Mikhaïel Salim Makhoul *

Eng. Mary Albahlit **

(Received 2 / 8/ 2021 . Accepted 10 /1 / 2022)

□ ABSTRACT □

The intelligence of swarms, which is one of the modern technologies in the field of artificial intelligence, which depends on imitating the collective social behavior of flocks of birds, fish, bees, and other social animals. In this research, we used two algorithms: Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) algorithm, in order to set the parameters of the Proportional Integral Derivative (PID) controller. Then, we tested the performance of these two algorithms and compared them by modeling the DC motor speed control system using Matlab / Simulink environment. In order to make the comparison, we relied on the performance indicators adopted in evaluating the performance of the control systems, which are indicators that depend on the value of the error calculated from the difference between the desired setting value of the response and the response value of the control system output. We chose two indicators: Integral of time multiplied Square Error (ITSE), and Integral of Time multiplied Absolute Error (ITAE). We relied on these two indicators as fitness functions of the two algorithms.

The results showed that the PSO algorithm is superior to the ACO algorithm in the process of adjusting the parameters of the PID controller when it is used in the process of controlling the speed of a DC motor. PSO algorithm gave significantly faster response than ACO algorithm. While both algorithms canceled the maximum overshoot and steady-state error of the control system output response, which are important indicators of the quality of the control system's performance.

Keywords: PID, Swarm Intelligence, Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization, DC motor.

* Professor in Tartous University, Technical Engineering Faculty, Industrial Automation Department.

** Master Student in Tartous University, Technical Engineering Faculty, Industrial Automation Department.

مقدمة

تشهد نظرية التحكم تطوراً كبيراً، لذا أصبح من المُحِبِّ تطوير حلقات التحكم التقليدية من خلال توليف المتحكمات بطرق حديثة تعتمد على طرق إيجاد الحل الأمثل للحصول على أفضل استجابة لنظام التحكم من خلال إيجاد أفضل بارامترات للمتحكم المسؤول بشكل أساسي عن عملية التحكم في نظام التحكم.

يعتبر المتحكم PID المتحكم الأكثر شهرة في المجال الصناعي، وذلك نظراً لبساطة بنيته وأدائه المستقر في ظروف التشغيل المختلفة. لقد تم استخدامه على نطاق واسع في أنظمة التحكم. لقد تمَّ إيجاد طرق توليف جديدة تعتمد على طرق إيجاد الحل الأمثل مثل الخوارزمية الجينية وخوارزمية المنة وغيرها [1،2،3]. لقد أثبتت طرق التوليف المعتمدة على إيجاد الحل الأمثل للمتحكم PID جدارتها بالمقارنة مع طرق التوليف التقليدية [3،4]. من هذه الطرق خوارزميات ذكاء الأسراب التي تسعى إلى إيجاد الحل الأمثل للعديد من المشاكل المطروحة في المجالات العلمية المختلفة [5،6]. حيث تقوم هذه الخوارزميات عند استخدامها في عملية توليف المتحكم PID بإيجاد قيم بارامترات PID التي تعطي أفضل استجابة لنظام التحكم، على عكس الطرق التقليدية التي يعتمد أغلبها على التجريب من أجل تحديد قيم بارامترات PID وفي أغلب الأحيان لا تعطي أفضل استجابة ممكنة لنظام التحكم [7].

من خوارزميات ذكاء الأسراب، خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب وخوارزمية مستعمرات النمل والنحل وخوارزمية الذئب الرمادية والضفادع القافزة وغيرها، التي تم استخدامها من قبل الباحثين في هذا المجال [5،6،7،8]. كما قام باحثون باستخدام المنطق الضبابي لتصميم متحكم PID ضبابي [8]، وقام آخرون بدمج المنطق الضبابي مع خوارزمية PSO [9] وأعطى هذا الدمج نتائج أفضل من PID الضبابي. ولجأ باحثون إلى الشبكات العصبونية [10] من أجل توليف المتحكم PID، في حين قام آخرون بدمج خوارزمية الذئب الرمادية مع المنطق الضبابي والشبكات العصبونية في نظام تحكم شبكي [11]، وأعطى هذا الدمج بين التقنيتين وخوارزمية ذكاء الأسراب نتائج أفضل من كل تقنية لوحدها، حيث أعطى الحد الأدنى من التجاوز ومن زمن الاستقرار وزمن الصعود.

تم في هذا البحث إجراء عملية التوليف للمتحكم PID باستخدام خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب وخوارزمية إيجاد الحل الأمثل لمستعمرات النمل. وتم استخدام هذه الطرق في عملية التحكم بسرعة محرك تيار مستمر، ثمَّ تمَّ إظهار ومقارنة النتائج التي حصلنا عليها من خلال نمذجة نظام التحكم المقترح في بيئة ماتلاب/سيمبوليك.

أهمية البحث وأهدافه

يهدف البحث إلى استخدام تقنيات ذكاء الأسراب من أجل ضبط بارامترات المتحكم PID في نظام تحكم بسرعة محرك تيار مستمر، وإظهار أهمية استخدام هذه التقنيات كخوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب وإيجاد الحل الأمثل لمستعمرات النمل في الحصول على أفضل استجابة لنظام التحكم. واستخدام الطرق المقترحة من أجل التحكم بسرعة محرك تيار مستمر، ومقارنة النتائج.

طرائق البحث ومواده

1. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID)

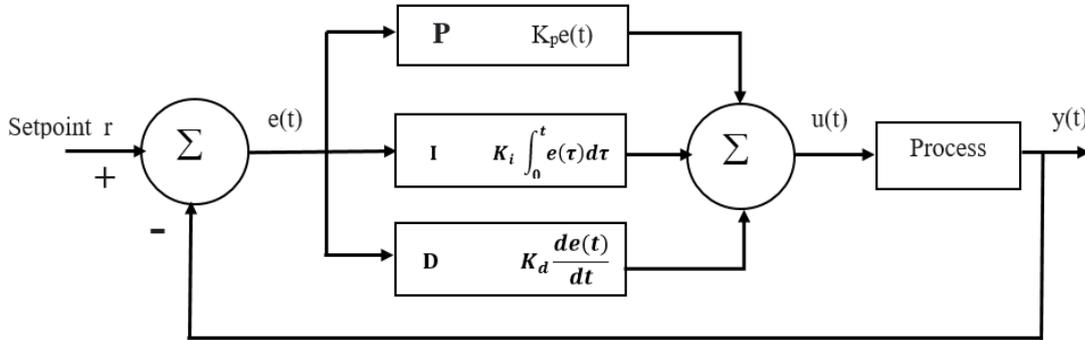
المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي هو آلية حلقة تحكم مغلقة مستخدمة بشكل واسع في أنظمة التحكم الصناعية. يعتمد هذا المتحكم بدرجة كبيرة على قياس نسبة الخطأ بين قيمة ضبط مرغوبة (Setpoint) والقيمة الفعلية (Actual Value) التي يتم قياسها من قبل العملية. الخطأ هو ناتج طرح قيمة الضبط من القيمة الفعلية كما يلي:

$$\text{الخطأ} = \text{قيمة الضبط المرغوبة} - \text{القيمة الفعلية المقاسة.}$$

الهدف من ال PID هو تقليل نسبة الخطأ لتصل إلى الصفر ، وهي الحالة المثالية حيث تتساوى قيمة الضبط مع القيمة الفعلية.

• آلية عمل ال PID:

يوضح الشكل التالي آلية عمل المتحكم PID [12]:



الشكل (1): مخطط صندوقي تفصيلي لآلية عمل المتحكم PID.

حيث نستنتج من الشكل (1) خرج المتحكم PID وفق المعادلة (1):

$$\text{Output}_{PID} = u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

• توليف المتحكم PID:

تعد عملية توليف الحلقة (Loop tuning) من أعقد وأخطر عمليات التحكم لاسيما التوليف المباشر أثناء العمليات، والسبب هو عدم وجود قانون ثابت يحكم العمل. فإذا أخطأنا باختيار القيم المناسبة لعناصر التوليف (معاملات المضخم التناسبي، التكاملي، والتفاضلي)، يمكن أن تصبح العملية المراد التحكم بها غير مستقرة وربما تخرج عن السيطرة.

• الهدف من توليف المتحكم PID:

نسعى عند توليف المتحكم PID، إلى الحصول على الاستجابة السريعة والاستقرار الجيد في نظام التحكم.

ولكن لسوء الحظ، لا يمكن إنجازهما معاً في نفس الوقت في الأنظمة العملية، بمعنى آخر:

* استجابة سريعة، الاستقرار سيء.

* استقرار أفضل، استجابة أبطأ.

لذلك نبحث عن التسوية التالية في أنظمة التحكم: استقرار مقبول وسرعة متوسطة للاستجابة [13].

2. محرك التيار المستمر (DC motor):

تستخدم محركات التيار المستمر في العديد من نظم التحكم الآلي، يعود ذلك بشكل أساسي لتوفرها في السوق باستطاعات وأحجام عديدة وبأسعار جيدة مقارنة بسهولة التحكم بها.

• الأسس النظرية لمحرك التيار المستمر:

يَحْكُمُ عمل محرك التيار المستمر أمران وهما المميزات الكهربائية والمميزات الميكانيكية [14]. يمكن انطلاقاً من هذه المميزات الوصول إلى تابع النقل لمحرك التيار المستمر، كما في المعادلة (2) [15]:

$$\frac{w(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{(R + Ls)(Js + b) + K_e \cdot K_t} \quad (2)$$

حيث:

w : سرعة المحرك.

V_a : الجهد المطبق على أطراف المحرك.

K_t ثابت عزم دوران المحرك.

R : مقاومة دائرة المتحرض.

L : محارضة دائرة المتحرض.

J : مجموع عزوم العطالة.

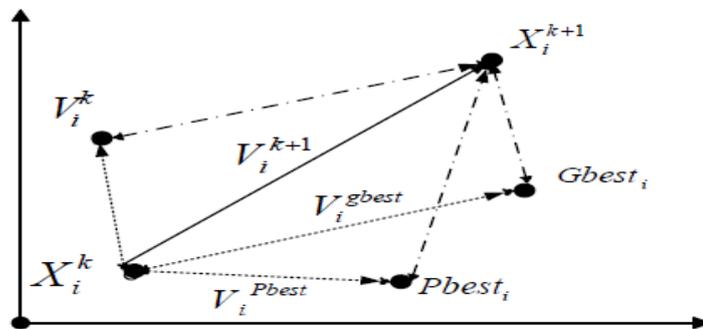
b : محصلة عوامل الاحتكاك.

K_e : ثابت سرعة المحرك.

3. خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب (Particle Swarm Optimization, PSO):

تم تطوير خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب PSO من قبل كينيدي وإبرهارت في عام 1995، وقد لاحظا السلوك الاجتماعي الذي يلهم حركة الأحياء من أسراب الطيور أو الأسماك [16].

تعتبر هذه الخوارزمية عن مجتمع مؤلف من مجموعة من العناصر كل عنصر يُدعى جزيء (particle). يتلخص عمل الخوارزمية بأن مجموعة من الطيور تبحث بشكل عشوائي عن الطعام ضمن منطقة ما. في البداية كل الطيور تجهل موضع قطعة الطعام، لكنها تعلم كم يبعد الطعام عنها بعد كل جولة، عندئذ يكون الحل الأفضل هو موضع العنصر الأقرب إلى الطعام. يوضح الشكل (2) كيفية انتقال العناصر أو الجزيئات بين المواقع المختلفة ضمن فضاء البحث.



الشكل (2): ضبط نقاط البحث في خوارزمية PSO [17].

• الحل الأفضل العام لخوارزمية إيجاد الحل الأمثل لجزيئات الأسراب (Global Best PSO):

إن gbest PSO – global best PSO هي طريقة تتأثر فيها وضعية كل عنصر بالعنصر ذو الملاءمة الأفضل داخل السرب. في هذه الطريقة كل عنصر لديه موقع محدد x_i في فضاء البحث، وسرعة محددة v_i ، وأفضل موقع خاص به $P_{best,i}$ ضمن فضاء البحث. وأفضل موقع يتم تحديده بناءً على تابع ملاءمة مناسب. بالإضافة إلى أفضل موقع ضمن عناصر السرب كله G_{best} . يتم حساب موقع كل عنصر من أجل كل لحظة t من المعادلة (3) [17]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (3)$$

حيث: x_i^{t+1} موقع العنصر i في اللحظة $t+1$.

x_i^t موقع العنصر i في اللحظة t .

v_i^{t+1} سرعة العنصر i في اللحظة $t+1$.

ومنه إذا كان موقع العنصر i في اللحظة t هو x_i^t ، فإنه سينتقل إلى موقع جديد x_i^{t+1} في اللحظة $t+1$ مع إزاحة نسميها v_i^{t+1} ، وسنطلق على هذه الإزاحة اسم سرعة، ومنه يمكن القول أن الموقع الجديد سيكون هو مجموع الموقع القديم والسرعة. ويتم حساب سرعة كل عنصر من أجل كل تكرار t من العلاقة (4) [17]:

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 r_1^t [P_{best,i}^t - x_i^t] + c_2 r_2^t [G_{best}^t - x_i^t] \quad (4)$$

حيث: w وزن الجمود ضمن المجال $[1-0]$.

v_i^t سرعة العنصر i في اللحظة t .

x_i^t موقع العنصر i في اللحظة t .

$P_{best,i}^t$ أفضل موقع للعنصر i حتى اللحظة t .

G_{best}^t أفضل موقع عام للعناصر في السرب حتى اللحظة t .

c_1 و c_2 معامل التسارع غالباً ما يؤخذ مساوياً 1 أو 2.

r_1^t and r_2^t قيمة عشوائية ضمن المجال $[0,1]$ في اللحظة t .

عندما يتحرك أي عنصر في السرب فإن سرعته ستتأثر بثلاث عوامل أساسية هي السرعة في اللحظة السابقة، والمركبة الثانية تحاول جذب الفرد إلى أحسن مكان قد مر به هذا الفرد على الإطلاق، والمركبة الثالثة تحاول جذب الفرد إلى موقع القائد، الذي يمثل مكانه أفضل موقع داخل السرب.

يحسب وزن الجمود w من العلاقة (5) [18]:

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \right) \times iter \quad (5)$$

حيث: w_{max} القيمة العظمى لوزن الجمود.

w_{min} القيمة الصغرى لوزن الجمود.

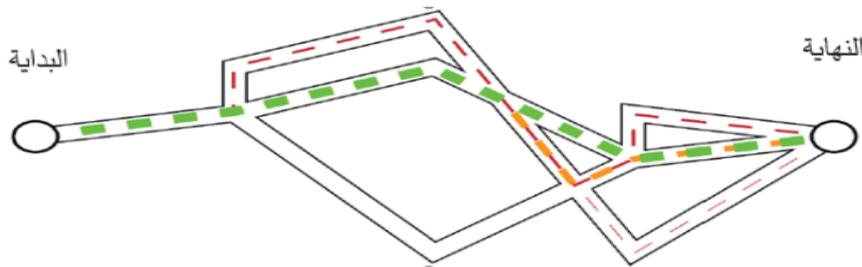
$iter_{max}$ عدد التكرارات الكلي.

$iter$ التكرار الحالي.

5. خوارزمية إيجاد الحل الأمثل لمستعمرات النمل (Ant Colony Optimization, ACO)

تم اقتراح الفكرة الأساسية لـ ACO في الأصل من قبل دورينغو في عام 1992 [19]. وهي تعتمد على سلوك النمل الباحث عن الطعام. تتعاون النملات لتجد الطريق الأقصر إلى مصدر الطعام. قد يحتوي الطريق بين أوكار النمل والطعام على العديد من التقاطعات. لذلك، فهي بحاجة إلى اتخاذ قرار بالطريق الذي ستسلكه عند كل تقاطع، ساعية لتقليل المسافة الإجمالية.

يتواصل النمل عن طريق إطلاق الفيرومونات (وهي عبارة عن مواد كيميائية تطلقها الكائنات الحية من النوع الواحد، بحيث تتناسب المادة المرسله مع المستقبله، وتشكل بذلك وسيلة تواصل بين الكائنات من نفس النوع) أثناء سفرهم من وإلى مصادر الغذاء [20]. تتبخر الفيرومونات بمرور الوقت. ويكون السفر في مسار قصير يستغرق وقتاً أقل، فإن ذلك يؤدي إلى المزيد من الفيرومونات على مسارات أقصر. من المُرجَّح أن يسافر النمل في مسار به المزيد من الفيرومونات. بمرور الوقت، يتقاربون على الطريق مع أقصر مجموعة من المسارات إلى الطعام، كما هو موضح في الشكل (3)، حيث يمثل اللون الأحمر كميات منخفضة من الفيرومونات والبرتقالي كميات متوسطة والأخضر كميات عالية [20].



الشكل (3): النمل يتعقب الفيرومونات لإيجاد المسار الأقصر.

• تحقيق خوارزمية النمل رياضياً:

تستخدم ACO مصفوفة الفيرومونات $\tau = \{\tau_{ij}\}$.

من أجل بناء الحلول الجيدة المرغوبة. تعطى القيم البدائية لـ τ_{ij} كما يلي:

$$\tau_{ij} = \tau_0 \forall (i, j); \tau_0 > 0$$

يمكن حساب احتمالية أن النملة A سوف تختار مسار من عقدة حالية i إلى عقدة محتملة j من خلال العلاقة (6). يمثل المجموع في المقام قيم كل العقد الأمامية المتاحة للنملة A في الزمن t. يمكن تغيير الثوابت α و β من أجل الترجيح، هذا يتضمن أيضاً قيمة إرشادية η_{ij} لكل عقدة، الغرض منها هو جعل الخوارزمية أكثر كفاءة من النمل في الطبيعة. يمكن تصميم تابع إرشادي بالاعتماد على الغرض من خوارزمية ACO. لأجل المعادلة (6)، يجب وضع القيم البدائية $\tau_0 > 0$ و $\eta_0 > 0$ لكل العقد [21].

$$P_{ij}^A(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i,j \in T^A} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (6)$$

حيث: α و β هي ثوابت تحدد الأثر الناتج عن قيم الفيرومونات والقيم الاستدلالية في قرار النملة. T^A هي الطريق المتأثر بالنملة A في زمن معطى.

يمكن تعريف كمية الفيرومونات $\Delta\tau_{ij}^A$ في كل طريق بالعلاقة (7):

$$\Delta\tau_{ij}^A = \begin{cases} L^{min} \\ \frac{L^A}{L^A} \text{ if } i, j \in T^A \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

حيث: L^A قيمة تابع الملازمة الذي تم إيجاده من قبل النملة A .

L^{min} الحل الأفضل الذي استنتجته مجموعة النملات حتى التكرار الحالي.

إن تبخر الفيومون هو طريقة لتجنب الزيادة اللامحدودة في أثر الفيومون. كما أنه يسمح بتتاسي الخيارات السيئة. الطريقة الشائعة هي خفض قيمة الفيومون الأساسية $\tau_{ij}(t-1)$ أولاً من أجل مسار ij عن طريق استخدام معامل تبخر الفيومون ρ ، من أجل إنقاص الخيارات الضعيفة (مع الزمن) كما هو مبين في المعادلة (8) [21].

$$\tau_{ij}(t) = \rho\tau_{ij}(t-1) = \sum_{A=1}^{NA} \Delta\tau_{ij}^A(t) \quad (8)$$

حيث: NA عدد النملات.

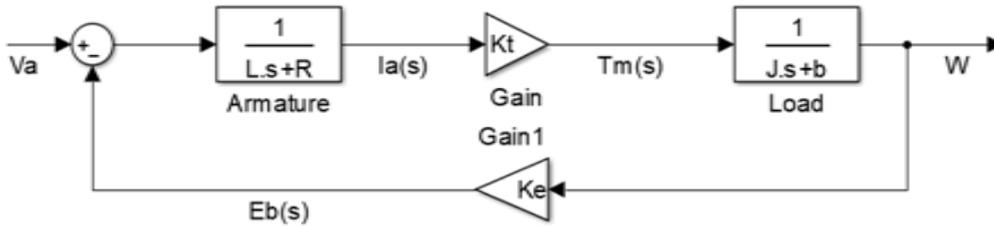
ρ معدل تبخر الفيومون ($0 < \rho < 1$).

6. نمذجة النظام باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك:

- بدأنا ببناء المتحكم PID انطلاقاً من المعادلة (1). بتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (1) نحصل على تابع النقل للمتحكم PID كما في المعادلة (9):

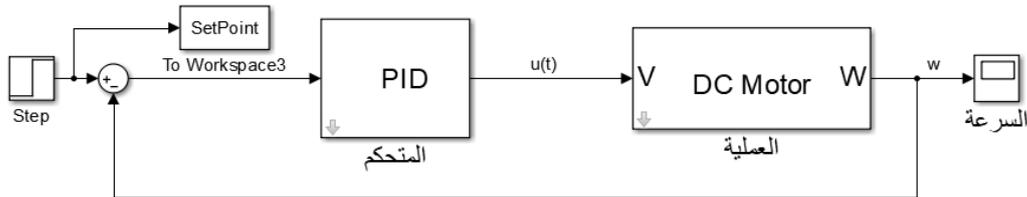
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (9)$$

- تمت نمذجة محرك التيار المستمر الذي يعبر عن العملية التي نسعى إلى التحكم بها من خلال النظام المقترح اعتماداً على تابع النقل الممثل لمحرك التيار المستمر المعطى في العلاقة (2). وبناء عليه يصبح نموذج محرك التيار المستمر باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك كما في الشكل (4).



الشكل (4): نمذجة محرك التيار المستمر باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك.

- بتجميع العناصر السابقة نحصل على الشكل النهائي لنموذج النظام المقترح كما في الشكل (5):



الشكل (5): نموذج ماتلاب/سيمبولينك لنظام التحكم بسرعة محرك تيار مستمر عن طريق متحكم PID.

- من أجل التحقق من عمل النموذج. وقبل البدء ببرمجة وتطبيق الطرق المختلفة لضبط بارامترات الـ PID، قمنا باستخدام محرك تيار مستمر له البارامترات المبينة في الجدول (1):

الجدول (1): بارامترات محرك التيار المستمر

البارامتر	الرمز	القيمة
المقاومة	R	2 أوم
المحارضة	L	0.7 هنري
معامل الاحتكاك	B	0.2 نيوتن.م/ثانية/راديان
ثابت سرعة المحرك	K_e	0.02 فولت ثانية/راديان
ثابت عزم دوران المحرك	K_t	0.02 نيوتن.م/أمبير
عزم العطالة	J	0.05 كغ.م ²

6-1 توليف المتحكم PID باستخدام PSO:

الهدف من عملية التوليف هذه هو إيجاد مزيج من قيم الأرباح التناسبي والتكاملي والتفاضلي والتي تعطي الأداء الأفضل، المقاس من تصغير قيمة تابع الملاءمة. من أجل توليف المتحكم PID باستخدام PSO، تم توليد تعداد سكاني لكل سرب مع عدد للأسراب يعتبر كافياً، حيث اخترنا عدد الأسراب 50 وعدد جزئيات كل سرب 50، يمكن زيادة أو إنقاص هذه القيم ولكن قمنا باختيارها بشكل وسطي، حيث أن إنقاصها قد يعطي نتائج غير دقيقة، كما أن زيادتها تؤدي إلى زيادة زمن التنفيذ. كل فرد يمثل جزئي وهو عبارة عن شعاع ثلاثي مكون من بارامترات المتحكم PID الثلاثة $[K_p, K_i, K_d]$. وسنقوم بحساب قيمة تابع الملاءمة الموافقة لكل جزئي من هذه الجزئيات حتى نحصل على أدنى قيمة لتابع الملاءمة وتكون البارامترات الموافقة له هي بارامترات PID التي تعطي أفضل استجابة لنظام التحكم. يوضح الجدول (2) قيم بارامترات خوارزمية PSO التي تم اعتمادها تجريبياً وبناءً على ما ذكرناه سابقاً في الفقرة 3 فيما يتعلق بكل بارامتر.

الجدول (2): قيم بارامترات خوارزمية PSO المقترحة.

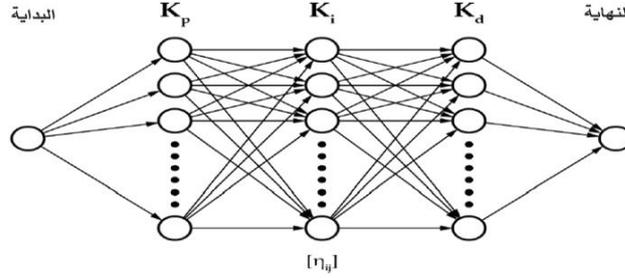
البارامتر	الرمز	القيمة
عدد الأسراب (التكرارات)	max_iter	50
عدد الجزئيات في كل سرب	noP	50
التسارع القريب	C1	2
التسارع الجماعي	C2	2
القيمة العظمى لوزن الجمود	wmax	0.9
القيمة الصغرى لوزن الجمود	wmin	0.2

6-2 توليف المتحكم PID باستخدام ACO:

يمكن تشبيه النمل الباحث عن الطعام الذي يلتقي عند تقاطع الطرق من أجل البحث عن المسارات الأقصر بعقد لقيم ربح مختلفة، كما في الشكل (6). عن طريق إنشاء مصفوفة من القيم المحتملة (أو خارطة عقد)، واختيار واحدة لكل ربح، وحساب تابع الملاءمة بالاعتماد عليهم، يمكن إيجاد الطول الإجمالي (الكلفة). سنعتبر التابع الاستدلالي η_{ij} في هذه الحالة كما هو معطى في العلاقة (8):

$$\eta_{ij} = \frac{1}{K_j}, j = [p, i, d] \quad (10)$$

ستعتمد كمية الفيبرمون المتناثرة على المسارات المختارة على نتيجة تابع الملاءمة. مع تكرار العملية، ستعطينا المسارات الأفضل قيم أرباح عالية للفيبرمونات.



الشكل (6): مثال على مسارات ACO اعتماداً على بارامترات PID.

يوضح الجدول (3) قيم بارامترات خوارزمية ACO التي تم اعتمادها تجريبياً وبناءً على ما ذكرناه في الفقرة 5 فيما يتعلق بكل بارامتر. وبالنسبة لعدد التكرارات وعدد النمل في كل تكرار فهي قيم اختيارية يمكن إنقاصها أو زيادتها، ولكن إنقاصها قد يعطي نتائج غير دقيقة، بالمقابل قد تعطي زيادتها نتائج أفضل ولكنها ستزيد من زمن التنفيذ.

الجدول (3): قيم بارامترات خوارزمية النمل المقترحة.

القيمة	الرمز	البارامتر
50	N_iter	عدد التكرارات
50	NA	عدد النمل في المستعمرة (في التكرار الواحد)
0.8	α	ثابت
0.2	β	ثابت
0.7	ρ	معدّل تبخر الفيبرمون
01000	N_node	عدد العقد لكل بارامتر

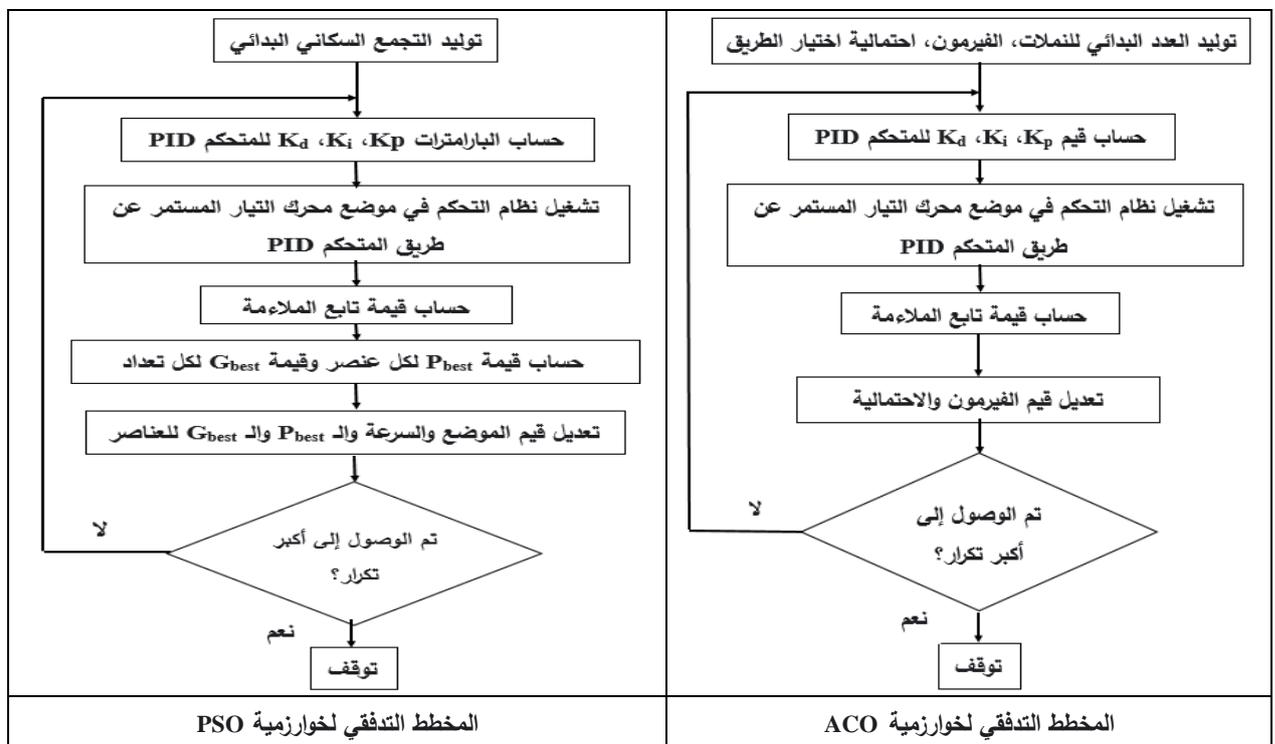
من أجل مقارنة النتائج التي حصلنا عليها من كل طريقة، نحن بحاجة إلى اختيار معاملات مقارنة. لذا قمنا باختيار مؤشرات الأداء المستخدمة لتقييم أداء أنظمة التحكم. حيث يعرف مؤشر الأداء على أنه العدد الذي يشير إلى جودة أداء النظام. ويعتبر النظام نظام تحكم أمثل عندما تعدّل بارامتراته بحيث يصل المؤشر إلى قيمة حدية، عادةً تكون قيمة أصغر. عندئذ يعرف النظام الأمثل بأنه النظام الذي يصغر قيمة هذا المؤشر. ولكي يكون مؤشر الأداء مفيداً يجب أن يكون دائماً رقماً موجباً أو صفراً، ويجب أن يكون تابعاً لبارامترات النظام. مؤشرات الأداء التي اعتمدنا عليها في هذا البحث هي تكامل جداء الزمن في الخطأ المطلق (Integral of Time multiplied Absolute Error, ITAE)، وتكامل جداء الزمن في مربع الخطأ (Integral Time multiplied Square Error, ITSE). يعطى هذان المؤشران بالمعادلتين (11 و 12) على التوالي:

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (11)$$

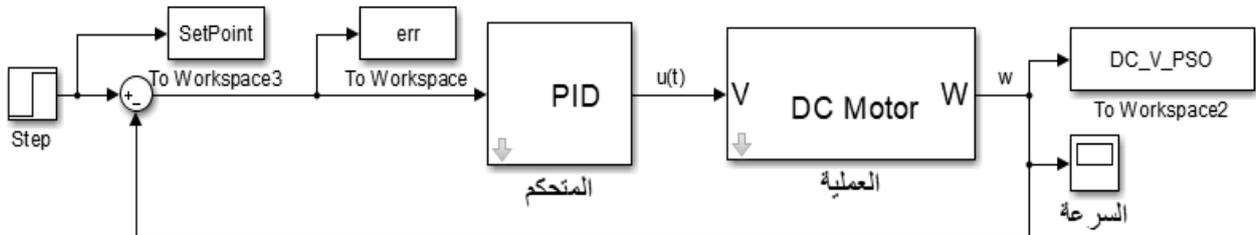
$$ITSE = \int_0^T te^2(t)dt \quad (12)$$

يمثل كل منهما تابع الملاءمة الذي تسعى خوارزمية إيجاد الحل الأمثل إلى إيجاد القيمة الصغرى له، التي سنتعطينا بالمقابل البارامترات المثلى للمتحكم PID.

لقد قمنا ببرمجة كل خوارزمية على حدى في ملف mfile وفق المخطط التدفقي الموضح في الشكل (7). وقمنا بربط الملف مع نموذج ماتلاب/سيمبولينك الموضح في الشكل (8)، بحيث يتم تمرير قيمة الخطأ $e(t)$ إلى الملف كمتحول عام من النموذج، حيث يتم حساب قيمة الخطأ من المعادلة $e(t) = 1 - y(t)$. حيث أن القيمة 1 تعبر عن القيمة المرجعية التي تم اختيارها وهي إشارة الخطوة الواحدة. $y(t)$ هي إشارة خرج النظام، وفي النظام الذي نعمل عليه تمثل إشارة سرعة محرك التيار المستمر w . ليتم تطبيق الخوارزمية التي تعمل بشكل تكراري، بحيث يتم حساب قيمة تابع الملاءمة الموافقة لقيمة الخطأ $e(t)$ المحسوبة من قبل النموذج. وهكذا حتى نحصل على قيم بارامترات PID المثلى التي تعطي أصغر قيمة لمؤشر الأداء وبالتالي الاستجابة المثلى المرغوبة للنظام.



الشكل (7): المخططات التدفقية لخوارزميات الضبط الأمثل لبارامترات المتحكم PID.



الشكل (8): نموذج سيمبولينك لنظام التحكم بسرعة محرك تيار مستمر عن طريق متحكم PID مع تمرير قيمة الخطأ كمتحول عام err من

أجل حساب قيمة تابع الملاءمة لخوارزمية PSO.

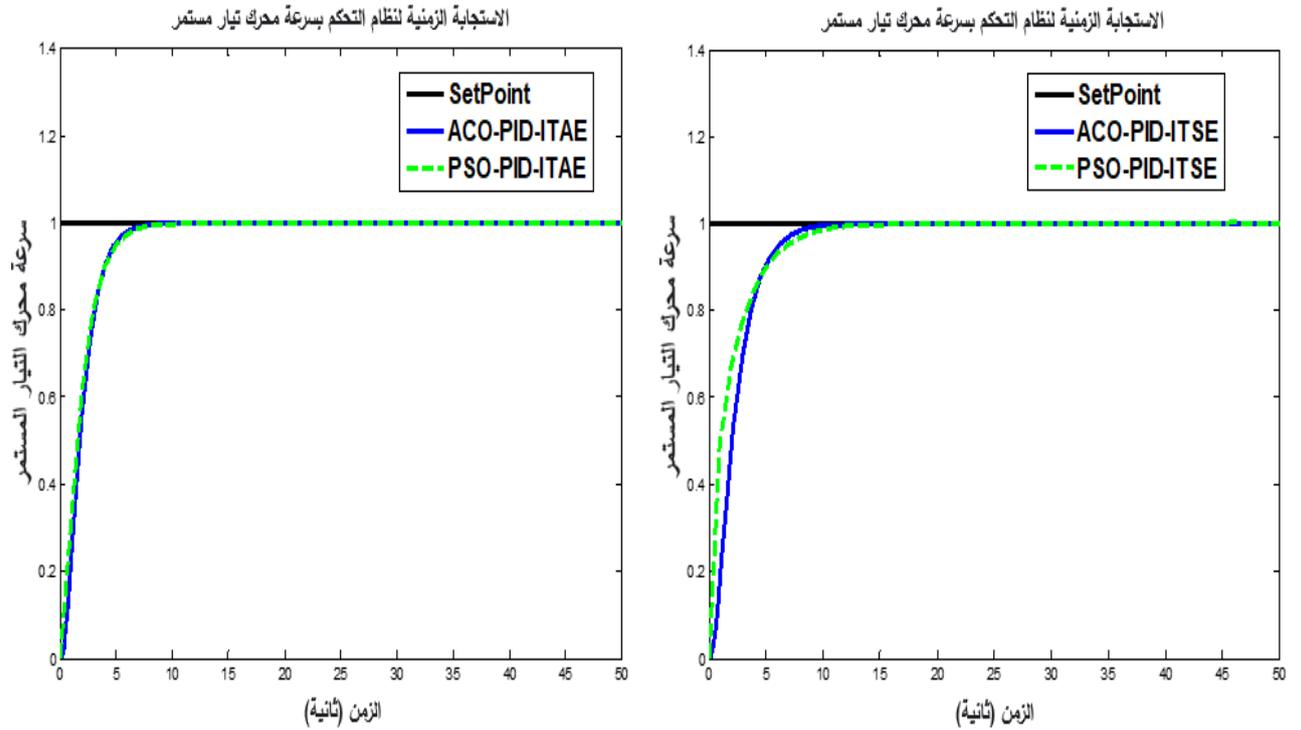
7. النتائج والمناقشة:

نلاحظ من خلال استخدام خوارزميات ذكاء الأسراب PSO، ACO في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID في أنظمة التحكم، فعالية هذه الخوارزميات في الحصول على خصائص جيدة لاستجابة نظام التحكم المدروس. حيث يوضح الجدول (4) والمنحنيات في الشكل (9) مقارنة مفصلة بين النتائج التي قمنا باختبارها من خلال نمذجة نظام التحكم بسرعة محرك تيار مستمر في بيئة ماتلاب/سيمبولينك.

يوضح الجدول (4) خصائص كل من الاستجابات التي حصلنا عليها عند ضبط بارامترات المتحكم PID باستخدام الخوارزميتين ACO و PSO وباستخدام توابع الملاعبة ITSE و ITAE مع كلتا الخوارزميتين. كما يعرض بارامترات PID التي حصلنا عليها بعد التوليف باستخدام خوارزميتي PSO و ACO، وكذلك القيمة المثلى لتابع الملاعبة التي حصلنا عليها من كل خوارزمية.

فعد المقارنة بناءً على المعيارين ITSE و ITAE كانت خوارزمية PSO ذات استجابة أسرع بشكل ملحوظ من خوارزمية ACO. حيث أنه عند المقارنة بناءً على المعيار ITSE أعطت خوارزمية PSO زمن صعود 4.9 ثانية وزمن استقرار 10.22 ثانية مقابل زمن صعود 18.5 ثانية وزمن استقرار 41.63 ثانية من أجل خوارزمية ACO. أيضاً عند المقارنة بناءً على المعيار ITAE أعطت خوارزمية PSO زمن صعود 3.71 ثانية وزمن استقرار 7.5 ثانية مقابل زمن صعود 6.07 ثانية وزمن استقرار 20.84 ثانية من أجل خوارزمية ACO. أما بالنسبة للتجاوز الأعظمي فقد كان قريباً جداً من الصفر (0.1 و 0.03%) عند استخدام خوارزمية PSO ومعدوماً عند استخدام خوارزمية ACO من أجل المعيارين ITSE و ITAE على التوالي. وتراوحت قيمة خطأ الحالة الثابتة بين 0% و 0.2% أي أنه معدوم تقريباً من أجل الخوارزميتين ومعيارى المقارنة.

بالنسبة لقيم تابع الملاعبة أعطت الخوارزميتان نفس القيمة تقريباً لتابع الملاعبة من أجل المعيار ITAE. ولكن من أجل المعيار ITSE أعطت خوارزمية PSO القيمة 2.55 مقابل 12.9 للخوارزمية ACO. ونستنتج من ذلك تفوق خوارزمية PSO على خوارزمية ACO من أجل المعيار ITSE من حيث إعطائها القيمة الأصغر لتابع الملاعبة.



الشكل (9): مقارنة الاستجابة الزمنية عند التوليف باستخدام الخوارزميتين ACO، PSO.

الجدول (4) مقارنة خصائص الاستجابة وبارامترات PID عند التوليف باستخدام خوارزميات PSO وACO.

نوع المتحكم	تابع الملاءمة	زمن الصعود T_r (ثانية)	التجاوز الأعظمي (%)	زمن الاستقرار T_s (ثانية)	خطأ الحالة الثابتة E_{ss} (%)	أفضل ملاءمة	K_p	K_i	K_d
ACO-PID	ITSE	18.5	0	41.63	0.2	12.9	9.44	9.6	0.38
	ITAE	6.07	0	20.84	0.03	5.87	2.1	10	0.06
PSO-PID	ITSE	4.9	0.1	10.22	0	2.55	10	10	0.02
	ITAE	3.71	0.03	7.5	0.03	5.88	2.05	10	0.005

8. الاستنتاجات والتوصيات

1-8 الاستنتاجات

نستنتج من المخططات في الشكل (9) والقيم الموضحة في الجدول (4)، ما يلي:

1. فعالية خوارزميات ذكاء الأسراب في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID المستخدم في أنظمة التحكم.
2. تفوقت خوارزمية PSO على خوارزمية ACO من حيث إعطائها أصغر قيمة لتابع الملاءمة ITSE.
3. تفوقت خوارزمية PSO على خوارزمية ACO من حيث سرعة الاستجابة، حيث أعطت خوارزمية PSO استجابة أسرع بشكل ملحوظ من خوارزمية ACO. وذلك عند مقارنة قيم زمن الصعود وزمن الاستقرار لكليهما.
4. ألغت كلتا الخوارزميتين التجاوز الأعظمي وخطأ الحالة الثابتة لاستجابة خرج نظام التحكم، وهي من الدلائل المهمة على جودة أداء نظام التحكم، ومن خصائص الاستجابة المرغوبة.

2-8 التوصيات

1. نوصي باستخدام خوارزميات تحكم أمثل أخرى، مثل خوارزميات مستعمرات النحل والعناكب والذئاب الرمادية من أجل توليف المتحكمات PID في أنظمة تحكم مختلفة.
2. نوصي باستمرار البحث لإيجاد خوارزميات تحكم مبتكرة ودمج أكثر من تقنية من أجل توليف متحكمات PID في أنظمة تحكم مختلفة.
3. نوصي باستخدام توابع ملاءمة مختلفة عن طريق وضع معادلات تجمع أكثر من مؤشر أداء بحيث تعطي نتائج أكثر دقة.

المراجع

- [1] El-Gendy, E. M., Saafan, M. M., Elksas, M. S., Saraya, S. F., & Areed, F. F. (2020). Applying hybrid genetic-PSO technique for tuning an adaptive PID controller used in a chemical process. *Soft Computing*, 24(5), 3455-3474.
- [2] Sabir, M. M., & Ali, T. (2016). Optimal PID controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system. *Applied Mathematics and Computation*, 274, 690-699.
- [3] Vásquez, M. C., & Katebi, R. (2016, August). *Comparison of PID methods for Networked Control Systems*. In *Control (CONTROL), 2016 UKACC 11th International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.

- [4] Ribeiro, J. M. S., Santos, M. F., Carmo, M. J., & Silva, M. F. (2017, May). *Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms. In Carpathian Control Conference (ICCC), 2017 18th International*(pp. 533-538). IEEE.
- [5] Björk, C. J. (2018). *PID tuning with Ant Colony Optimization (ACO): A framework for a step response based tuning algorithm.*
- [6] Yazgan, H. R., Yener, F., Soysal, S., & Gür, A. E. (2019). *Comparison Performances of PSO and GA to Tuning PID Controller for the DC Motor. Sakarya University Journal of Science, 23*(2), 162-174.
- [7] مخول، مخائيل، البهليط، & ماري. (2020). الضبط الأمثل لبارامترات المتحكم PID لمعالجة أثر التأخيرات الزمنية في أنظمة التحكم الشبكية. مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية- سلسلة العلوم الهندسية، 4(9).
- [8] Jahromi, B. H., AlModarresi, S. M. T., & Hajebi, P. (2017, November). *Fuzzy logic soft-switch controller for networked control systems. In Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2017 5th International Conference on* (pp. 18-22). IEEE.
- [9] خضور، رامي. (2018). مقارنة بين تقنيتي PID-PSO و Fuzzy-PSO للتحكم بزاوية نواس معكوس. مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية، 2(1).
- [10] Jing, S., Guo, S., Zhao, X., & Ren, X. (2015, October). *BP neural network PID controller of pocket dropout. In Computer and Communications (ICCC), 2015 IEEE International Conference on*(pp. 67-71). IEEE.
- [11] Pal, D., & Bhagat, S. K. (2020). *Design and Analysis of Optimization based Integrated ANFIS-PID Controller for Networked Controlled Systems (NCSs). Cogent Engineering, 7*(1), 1772944.
- [12] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning* (Vol. 2). Research Triangle Park, NC: Instrument society of America.
- [13] شيحا، بلال، عبيد، & باسل. (2016). المنظم التناسبي التكاملية التفاضلي (PID) من الدراسة النظرية إلى التطبيق العملي باستخدام المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة (PLC) مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية- سلسلة العلوم الهندسية، 37(1).
- [14] Zaccarian, L. (2012). *DC motors: dynamic model and control techniques. Lecture notes., roma, italy.*
- [15] Raghavan, S. (2005). *Digital control for speed and position of a DC motor. Texas A&M University-Kingsville.*
- [16] R. Eberhart, "Kennedy. Particle swarm optimization," in *Proceeding IEEE Inter Conference on Neural Networks, Perth, Australia, Piscataway, 1995, vol. 4, pp*
- [17] J. Xin, G. Chen, and Y. Hai., "A Particle Swarm Optimizer with Multistage Linearly-Decreasing Inertia Weight", In *Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on*, volume 1, pages 505–508. IEEE, 2009.
- [18] Dharshan, Y., Srinivasan, K., & Sharmila, B. (2017, December). Optimization technique for networked control DC motor with network-induced delays and noise. In *Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions)(ICTUS), 2017 International Conference on* (pp. 756-762). IEEE.
- [19] M. Dorigo, "Optimization, learning and natural algorithms", *PhD thesis*, Milan: Polytechnic University of Milan, 1992.
- [20] I. Chiha, N. Liouane & P. Borne, "Tuning PID Controller Using Multiobjective Ant Colony Optimization", *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2012, pp 1-7, 2012.
- [21] SIAW KAH, J. I. N. G. (2012). *PID-Controller Tuning of Brushless DC Motor by Using ACO (Ant Colony Optimization) Technique.*