



كلية الهندسة - جامعة بغداد

## Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences

مجلة اتحاد الجامعات العربية للدراسات والبحوث الهندسية



اتحاد الجامعات العربية

# الضبط الأمثل لبارامترات المتحكم PID باستخدام خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل في نظام تحكم شبكي

ماري ميشيل البهليط<sup>1\*</sup>، مخائيل سليم مخول<sup>2</sup><sup>1</sup> قسم الأتمتة الصناعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، سوريا، mary.albahlit@gmail.com<sup>2</sup> قسم الأتمتة الصناعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، سوريا

\* الباحث الممثل: ماري ميشيل البهليط، mary.albahlit@gmail.com

نشر في: 30 ايلول 2022

**الخلاصة-** تم في هذا البحث بتطبيق خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل (Ant Colony Optimization, ACO)، وهي إحدى خوارزميات إيجاد الحل الأمثل، وذلك من أجل ضبط بارامترات المتحكم (Proportional Integral Derivative, PID) بهدف استخدام هذا المتحكم في عمليات التحكم الشبكية التي تعاني غالباً من مشكلة التأخيرات الزمنية التي تؤثر بشكل ملحوظ على جودة إشارة التحكم وبالتالي على جودة الاستجابة. وقمنا بتوظيف هذا المتحكم في عملية التحكم بموضع محرك تيار مستمر مع الأخذ بعين الاعتبار لوجود تأخيرات زمنية متفاوتة في نقل إشارة التحكم. وقمنا بنمذجة نظام التحكم بموضع محرك تيار مستمر باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك. وأظهرت النتائج فعالية خوارزمية ACO في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID للحد من أثر التأخيرات الزمنية على جودة الاستجابة بالمقارنة مع الطرق التجريبية التقليدية. وقمنا باستخدام مؤشرات الأداء المستخدمة في تقييم أداء أنظمة التحكم كتتابع ملائمة لخوارزمية ACO. وأعطت الخوارزمية أفضل استجابة لنظام التحكم المقترح عند استخدام مؤشر الأداء تكامل الخطأ المطلق كتابع ملائمة. حيث أعطت عند التأخير 200 ميلي ثانية، أصغر زمن صعود 8.43 ثانية مع أصغر زمن استقرار 0.92 ثانية، مع حافة تجاوز أعظمي صغيرة نسبياً 3.27%. كما أعطت قيم مقاربة لكل مؤشر أداء على حدى، وذلك من أجل تأخيرات زمنية 100 و200 و300 ميلي ثانية.

**الكلمات الرئيسية** – "المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي، خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل، نظام التحكم الشبكي، التأخيرات الزمنية، محرك التيار المستمر، ماتلاب/سيمولينك"

## 1. المقدمة

الأمتل جدارتها بالمقارنة مع طرق التوليف التقليدية، ولاسيما في أنظمة التحكم الشبكية [5]. ومن هذه الطرق الخوارزميات الذكية التي تسعى إلى إيجاد الحل الأمثل للعديد من المشاكل المطروحة في المجالات العلمية المختلفة. من هذه الخوارزميات خوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب والخوارزمية الجينية وخوارزمية أمثلة مستعمرات النمل والنحل وغيرها، والتي تم استخدامها من قبل الباحثين في هذا المجال [4، 17، 21]. كما قام باحثون باستخدام الشبكات العصبونية [9]، ولجأ آخرون إلى المنطق الضبابي لتصميم متحكم PID ضبابي [8] من أجل توليف المتحكم PID في أنظمة تحكم شبكية. في حين قام بعض الباحثين بدمج المنطق الضبابي مع الشبكات العصبونية [12]، وأعطى هذا الدمج بين التقنيتين نتائج أفضل من استخدام كل تقنية لوحدها.

قمنا من خلال هذا البحث باستخدام خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل من أجل إجراء عملية التوليف للمتكم PID. وقمنا بتوظيف المتحكم بعد توليفه في عملية التحكم بموضع محرك تيار مستمر، بوجود تأخيرات زمنية متفاوتة في نقل إشارة التحكم. وأظهرنا النتائج من خلال محاكاة النظام المقترح باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك.

### 1.1 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

انتشر استخدام الشبكات الحاسوبية بشكل ملحوظ في مجالات العمل المختلفة، لتسهيل التواصل بين الأشخاص ومحطات العمل وحتى بين الشركات الموجودة في بلدان مختلفة. من جهة ثانية، تشهد نظرية التحكم تطوراً كبيراً، وأصبح تطوير حلقات التحكم التقليدية لتعمل عبر الشبكة أمراً ضرورياً.

ظهرت في العقود الأخيرة، أنظمة التحكم الشبكية (Networked Control Systems, NCS) التي تفصل بين العملية والمتحكم. وقد اهتم الباحثون بإجراء العديد من الأبحاث التي اهتمت بدراسة طرق مختلفة لتصميم هذه الأنظمة، وكيفية الحفاظ على استقرارها وقوتها [6]. ولكن، تعاني أنظمة التحكم الشبكية من مشكلة التأخير الزمني الناتج عن إرسال واستقبال رزم البيانات عبر خطوط الاتصال، وهذا التأخير لديه عادة طبيعة عشوائية [10]. لذلك كان لا بد من تطوير حلقات التحكم التقليدية لتأخذ بعين الاعتبار التأخيرات الزمنية أثناء عمليات نقل البيانات عبر الشبكة. مما دفع الأبحاث إلى استخدام خوارزميات جديدة لتصميم وتوليف المتحكمات بحيث تتناسب مع بنية الشبكات الحاسوبية والتأخيرات الزمنية الحاصلة فيها [14، 16].

يعتبر المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID المتحكم الأكثر شهرة في المجال الصناعي، وذلك نظراً لبساطته وبنائه المستقر في ظروف التشغيل المختلفة. وقد تم الاعتماد عليه بشكل كبير في أنظمة التحكم الشبكية حيث تم إيجاد طرق توليف جديدة لتتناسب مع التأخيرات الزمنية متفاوتة [14، 16]. وقد أثبتت طرق توليف المتحكم PID المعتمدة على التحكم

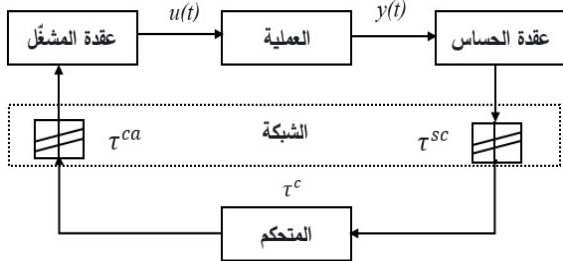
1. زمن نقل البيانات بين عقدة الحساس والمتحكم  $\tau^{sc}$ .

2. زمن الحوسبة في المتحكم  $\tau^c$ .

3. زمن نقل البيانات بين المتحكم وعقدة المشغل  $\tau^{ca}$ .

هذه التأخيرات الثلاثة موضحة في الشكل (2).

بشكل عام، التأخير الزمني هو مجموع زمن الحوسبة، زمن القياس، زمن المعالجة والزمن الذي تحتاجه إشارة التحكم للعبور عبر الشبكة. حيث تحتاج الإشارة بعض الوقت للانتقال بين المتحكم والمشغل، وبين الحساس والمتحكم.



الشكل 2: التأخير الزمني في نظام تحكم شبكي [10].

### 1.3 محرك التيار المستمر

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

الأسس النظرية لمحرك التيار المستمر:

يُحْكَم عمل محرك التيار المستمر أمران وهما المميزات الكهربائية والمميزات الميكانيكية. يمكن انطلاقاً من هذه المميزات الوصول إلى تابع النقل لمحرك التيار المستمر، كما في المعادلة (2) [19]:

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

حيث:

w: سرعة المحرك.

$V_a$ : الجهد المطبق على أطراف المحرك.

$K_t$ : ثابت خاص بالمحرك.

R: مقاومة دائرة المتحرض.

L: محارضة دائرة المتحرض.

J: مجموع عزوم العطالة.

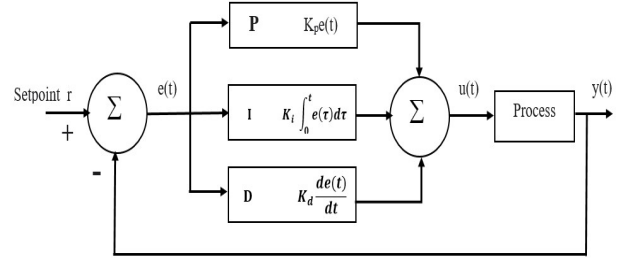
b: محصلة عوامل الاحتكاك.

$K_e$ : ثابت خاص بالمحرك.

(Actual Value) التي يتم قياسها من قبل العملية [1]. الخطأ هو ناتج طرح قيمة الضبط من القيمة الفعلية كما يلي:

الخطأ = قيمة الضبط المرغوبة - القيمة الفعلية المقاسة.

والهدف من الـ PID هو تقليل نسبة الخطأ لتصل إلى الصفر، وهي الحالة المثالية حيث تتساوى قيمة الضبط مع القيمة الفعلية [1].



الشكل 1: مخطط صندوقي تفصيلي يوضح آلية عمل المتحكم PID.

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

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

### 1.1.1.1 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، التكامل، والتفاضلي)، يمكن أن تصبح العملية المراد التحكم بها غير مستقرة وربما تخرج عن السيطرة.

### 1.2.1 الهدف من توليف المتحكم PID:

نرغب عند توليف المتحكم PID، في 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 [20].

### 1.2 نظام التحكم الشبكي (Network Control System, NCS)

نظام التحكم الشبكي هو نظام تحكم ذو حلقة مغلقة حيث تكون حلقات التحكم مغلقة عبر شبكة زمن حقيقي. يتم تبادل المعلومات (الدخل المرجعي، خرج الآلة، دخل التحكم، .. إلخ) في نظام التحكم الشبكي باستخدام الشبكة عبر مكونات نظام التحكم (الحساسات، المتحكمات، المشغلات).

### 1.2.1.1 زمن التأخير في نظام التحكم الشبكي

يوضح الشكل (2)، نظام تحكم شبكي مكون من منشأة، حساس، مشغل، متحكم وشبكة. حيث يتصل المتحكم المركزي مع عقدة الحساس والمشغل عبر الشبكة [10].

يوجد ثلاثة أنواع للتأخيرات في أنظمة التحكم الشبكية [10]:

من أجل بناء الحلول الجيدة المرغوبة. تعطى القيم البدائية ل  $\tau_{ij}$  كما في المعادلة (4) [2]:

$$\tau_{ij} = \tau_0 \forall (i, j); \tau_0 > 0 \quad (4)$$

يمكن حساب احتمالية أن النملة A سوف تختار مسار من عقدة حالية i إلى عقدة محتملة j من خلال العلاقة 4. المجموع في المقام لقيم كل العقد الأمامية المتاحة للنملة A في الزمن t. يمكن تغيير الثوابت  $\alpha$  و  $\beta$  من أجل الترجيح. هذا يتضمن أيضاً قيمة إرشادية  $\eta_{ij}$  لكل عقدة. الغرض منها هو جعل الخوارزمية أكثر كفاءة من النمل في الطبيعة. يمكن تصميم تابع إرشادي بالاعتماد على الغرض من خوارزمية ACO. كما تظهر المعادلة (5)، يجب وضع القيم البدائية  $\tau_0 > 0$  و  $\eta_0 > 0$  لكل العقد [2].

$$P_{ij}^A(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i,j \in T^A} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (5)$$

حيث:

$\alpha$  و  $\beta$  هي ثوابت تحدد الأثر الناتج عن قيم الفيرون والقيم الاستدلالية في قرار النملة.

$T^A$  هي الطريق المتأثر بالنملة A في زمن معطى.

يمكن تعريف كمية الفيرون  $\Delta\tau_{ij}^A$  في كل طريق بالعلاقة (6):

$$\Delta\tau_{ij}^A = \begin{cases} L^{min} \\ L^A \text{ if } i, j \in T^A \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

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

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

إن تبخر الفيرون هو طريقة لتجنب الزيادة اللامحدودة في أثر الفيرون. كما أنها تسمح بتناسي الخيارات السيئة. الطريقة الشائعة هي خفض قيمة الفيرون الأساسية  $\tau_{ij}(t-1)$  أولاً من أجل مسار  $ij$  عن طريق عامل  $\rho$ ، من أجل إنقاص الخيارات الضعيفة (مع الزمن) [7][2].

$$\tau_{ij}(t) = \rho\tau_{ij}(t-1) = \sum_{A=1}^{NA} \Delta\tau_{ij}^A(t) \quad (7)$$

حيث: NA: عدد النملات.

$\rho$ : معدل تبخر الفيرون.  $0 < \rho < 1$

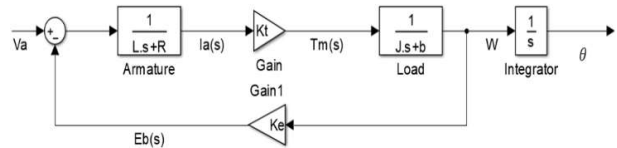
## 2. أهداف البحث

يهدف هذا البحث إلى استخدام طرق التحكم الأمثل من أجل توليف المتحكم PID في نظام تحكم شبكي. وإظهار أهمية استخدام الخوارزميات الذكية كخوارزمية أمثلة مستعمرات النمل في التغلب على أثر التأخيرات الزمنية التي تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية بالمقارنة مع طرق التوليف التقليدية. واستخدام الطرق المقترحة من أجل التحكم بموضع محرك تيار مستمر.

ومن أجل الحصول على موضع المحرك  $\theta$  نقوم بمكاملة السرعة  $w$  [13]. وفق المعادلة (3):

$$\theta(s) = \frac{1}{s} w(s) \quad (3)$$

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 سيمبوليك ماتلاب كما في الشكل (3).

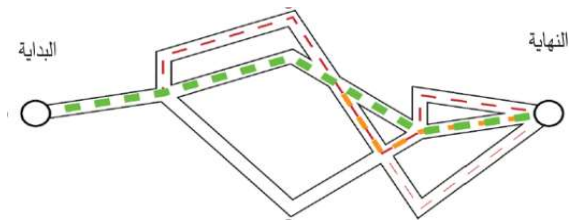


الشكل 3: نمذجة محرك التيار المستمر باستخدام السيمبوليك ومكاملة السرعة للحصول على الموضع.

## 1.4 خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل Ant Colony Optimization

تستخدم هذه الخوارزمية بشكل خاص من أجل إيجاد الحلول لمشاكل الأمثلة المختلفة. تتعاون النملات الصناعيات في المستعمرة من أجل إيجاد حلول جيدة. واعتماداً على التشابه بين خوارزمية مستعمرات النمل ومستعمرات النمل في الطبيعة، فإن خوارزمية النمل قوية وقابلة للتكيف ويمكن تطبيقها على إصدارات مختلفة من المشكلة نفسها بالإضافة إلى مشاكل الأمثلة المختلفة [15].

تم اقتراح الفكرة الأساسية ل ACO في الأصل من قبل دوريجو في عام 1992 [11]. 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 المستقبل، وتشكل بذلك وسيلة تواصل بين الكائنات من نفس النوع) أثناء سفرهم من وإلى مصادر الغذاء [7]. تتبخر الفيرومونات بمرور الوقت. وكون السفر في مسار قصير يستغرق وقتاً أقل، فإن ذلك يؤدي إلى المزيد من الفيرومونات على مسارات أقصر. من المرجح أن يسافر النمل في مسار به المزيد من الفيرومونات [11]. بمرور الوقت، يتقاربون على الطريق مع أقصر مجموعة من المسارات إلى الطعام، كما هو موضح في الشكل (4)، حيث يمثل اللون الأحمر كميات منخفضة من الفيرومونات والبرتقالي كميات متوسطة والأخضر كميات عالية [2].

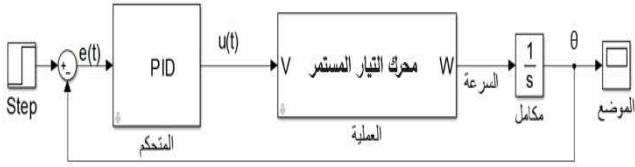


الشكل 4: النمل يتعقب الفيرون لإيجاد المسار الأقصر [2].

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

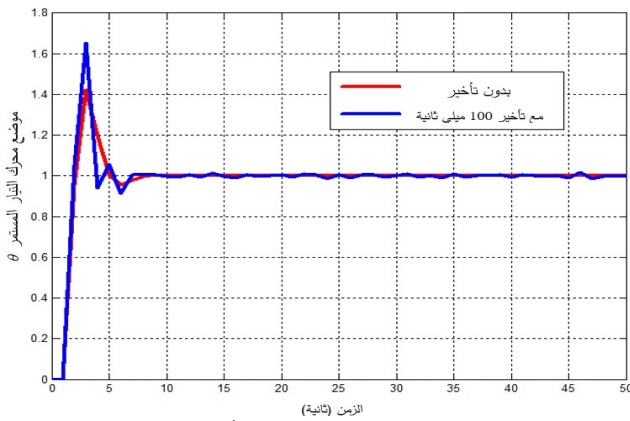
## 3. منهجية البحث

في البداية اختبرنا استجابة النظام في حال عدم وجود تأخير زمني في نقل إشارة التحكم، أي في حال النموذج من الشكل (7).

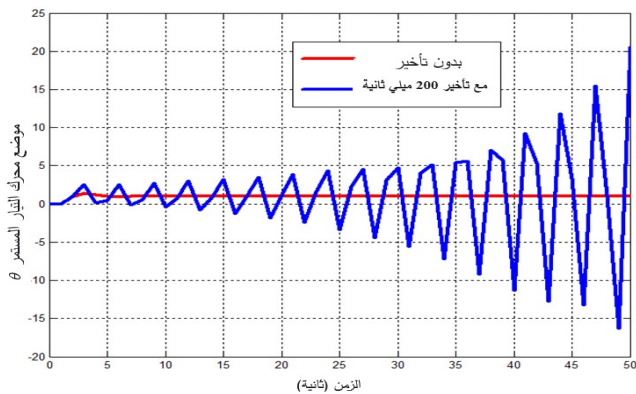


الشكل 7: النظام المقترح بدون تأخير زمني في نقل إشارة التحكم.

بعد ذلك قمنا بإضافة تأخير زمني بمقدار 100 ميلي ثانية ثم 200 ميلي ثانية. وذلك في النموذج الموضح في الشكل (6). فكانت إشارة الموضع كما في الشكل (8).



الشكل 8.a: تذبذب الاستجابة عند إضافة تأخير زمني بمقدار 100 ميلي ثانية في نقل إشارة التحكم.



الشكل 8.b: التذبذب الكبير في الاستجابة عند إضافة تأخير زمني بمقدار 200 ميلي ثانية في نقل إشارة التحكم.

نلاحظ التغير الكبير في شكل الاستجابة والذي تسبب به التأخير الزمني. ونلاحظ أن زيادة التأخير الزمني تزيد من تشوه الاستجابة حيث تؤدي إلى تذبذب كبير وعدم استقرار إشارة خرج نظام التحكم.

## 3.2 تطبيق خوارزمية ACO على النموذج المدروس:

بعد ذلك قمنا بتوليف المتحكم PID باستخدام ACO. الهدف من عملية التوليف هذه هو إيجاد مزيج من قيم الأرباح التناسبي والتكاملي والتفاضلي والتي تعطي الأداء الأفضل، المقاس من تصغير قيمة تابع الملاءمة. يمكن تشبيه النمل الباحث عن الطعام الذي يلتقي عند تقاطع الطرق من أجل البحث عن المسارات الأقصر بعقد لقيم ربح مختلفة، كما في الشكل (9). عن طريق إنشاء مصفوفة من القيم المحتملة (أو خارطة عقد)، واختيار

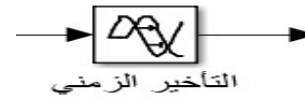
## 3.1 نمذجة النظام باستخدام ماتلاب/سيمبوليك:

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

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (8)$$

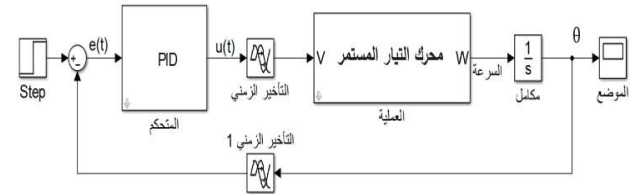
ذكرنا في الفقرة الخاصة بمحرك التيار المستمر كيفية نمذجة محرك التيار المستمر في سيمبوليك ماتلاب كما في المعادلة (2).

الآن ننقل إلى نمذجة التأخير الزمني، الذي سنقوم من خلال هذا البحث بالعمل على تقليل تأثيره على إشارة التحكم في النظام المدروس. سنقوم بنمذجة التأخير الزمني باستخدام صندوق النقل ذو التأخير الزمني (Transport Delay Block) الموضح في الشكل (5)، وهو يقوم بتأخير ظهور إشارة دخله بمقدار محدد من الزمن.



الشكل 5: صندوق التأخير الزمني في سيمبوليك.

بتجميع العناصر السابقة نحصل على الشكل النهائي لنموذج النظام المقترح كما في الشكل (6):



الشكل 6: نموذج سيمبوليك لنظام التحكم بموضع محرك تيار مستمر عن طريق متحكم PID بوجود تأخير زمني عند نقل إشارة التحكم من المتحكم إلى المحرك.

من أجل التحقق من عمل النموذج. وقيل البدء ببرمجة وتطبيق الطرق المختلفة لضبط بارامترات الـ PID، قمنا بإعطاء قيم تجريبية لبارامترات الـ PID (أي باستخدام التوليف اليدوي)، كما يلي:  $K_p=50$ ,  $K_i=40$ ,  $K_d=20$ . كما قمنا بتحديد بارامترات محرك التيار المستمر كما في الجدول (1):

الجدول 1: بارامترات محرك التيار المستمر

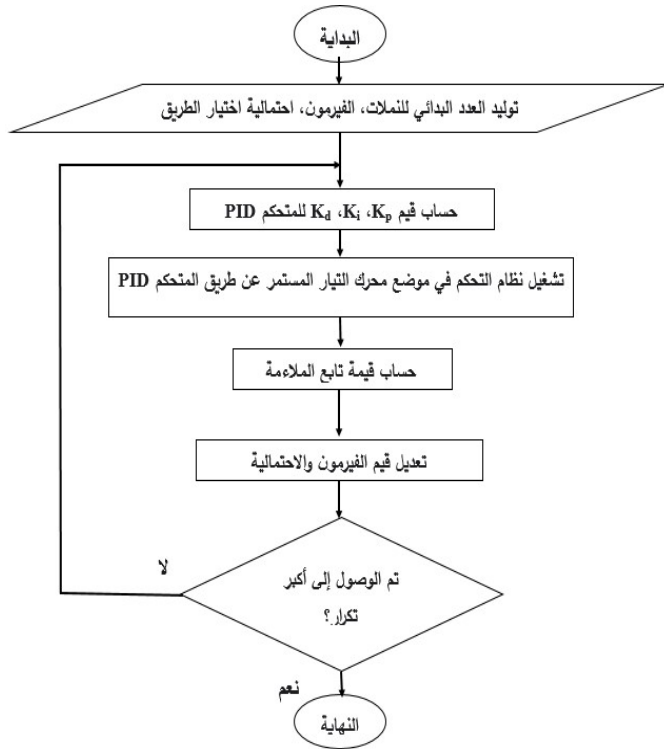
البارامتر	الرمز	القيمة
المقاومة	R	2 أوم
المحارضة	L	0.7 هنري
معامل الاحتكاك	B	0.2 نيوتن.م/ثانية/راديان
ثابت سرعة المحرك	$K_e$	0.02 فولت ثانية/راديان
ثابت عزم دوران المحرك	$K_t$	0.02 نيوتن.م/أمبير
عزم العطالة	J	0.05 كغ.م <sup>2</sup>

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

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt \quad (13)$$

وكل منها يعبر عن تابع الملاءمة الذي تسعى الخوارزمية إلى إيجاد القيمة الصغرى له. والتي ستعطينا بالمقابل البارامترات الأمثلية للمتحكم PID.

وقد قمنا ببرمجة الخوارزمية في ملف mfile وفق المخطط التدفقي الموضح في الشكل (10) للخوارزمية. واستخدمنا قيم بارامترات خوارزمية النمل الموضحة في الجدول (3). وقمنا بربط الملف مع نموذج سيموليناك الموضح في الشكل (11)، بحيث يتم تمرير قيمة الخطأ  $e(t)$  إلى الملف كمتحول عام من النموذج  $err$ ، 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 المدروس هي إشارة موضع محرك التيار المستمر  $\theta$ . 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 الأمثلية التي تعطي أصغر قيمة لمؤشر الأداء وبالتالي الاستجابة الأمثلية المرغوبة للنظام.

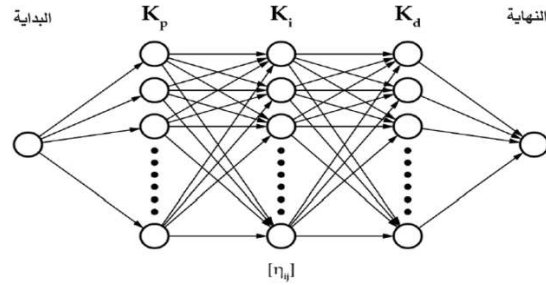


الشكل 10: المخطط التدفقي لخوارزمية ACO-PID.

واحدة لكل ربح، وبعد ذلك حساب تابع الملاءمة بالاعتماد عليهم، يمكن إيجاد الطول الإجمالي (الكلفة). وسنعتبر التابع الاستدلالي  $\eta_{ij}$  في هذه الحالة كما في العلاقة (9):

$$\eta_{ij} = \frac{1}{K_j}, j = [p, i, d] \quad (9)$$

ستعتمد كمية الفيرمون المتناثرة على المسارات المختارة على نتيجة تابع الملاءمة في إحدى المعادلات (10-13). ومع تكرار العملية، ستعطينا المسارات الأفضل قيم أرباح عالية للفيرمونات.



الشكل 9: مثال على مسارات ACO اعتماداً على بارامترات PID.

#### 4. الاختبارات والنتائج

من أجل مقارنة النتائج التي حصلنا عليها من أجل كل تأخير زمني، نحن بحاجة إلى اختيار معاملات مقارنة. 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 تعدل بارامتراته بحيث يصل المؤشر إلى قيمة حدية، عادة 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 موضحة في الجدول (2):

الجدول 2: مؤشرات الأداء المستخدمة لتقييم أداء أنظمة التحكم.

ISE	Integral Square Error	تكامل مربع الخطأ
ITAE	Integral of Time multiplied Absolute Error	تكامل جداء الخطأ المطلق في الزمن
ITSE	Integral of Time multiplied Square Error	تكامل جداء الزمن في مربع الخطأ
IAE	Integral Absolute Error	تكامل الخطأ المطلق

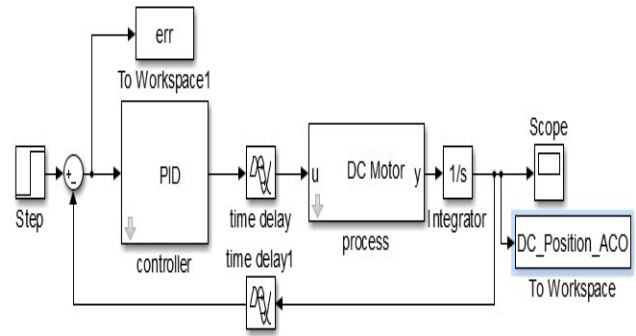
وتعطي مؤشرات الأداء بالمعادلات التالية:

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (10)$$

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



1.87	93.92	20.54	10.59	300ms	ISE
1.58	82.62	3.7	13.5	100ms	ACO-PID-ITAE
1.9	53.55	2.6	10.18	200ms	
0.28	35.04	0.16	9.51	300ms	
1.56	106.75	7.4	15.77	100ms	ACO-PID-ITSE
1.86	46.7	1.01	15.5	200ms	
1.09	37.95	1.41	10.68	300ms	
1.62	44.11	0.58	16.11	100ms	ACO-PID-IAE
0.84	0.92	3.27	8.43	200ms	
1.68	0.94	3.33	11.64	300ms	



**الشكل 11:** نموذج سيمبوليك لنظام التحكم بمحرك تيار مستمر عن طريق متحكم PID بوجود تأخير زمني عند نقل إشارة التحكم من المتحكم إلى المحرك مع تمرير قيمة الخطأ كمتحول عام err من أجل حساب قيمة تابع الملاءمة ISE لخوارزمية ACO.

حيث يوضح الجدول (4) خصائص كل من الاستجابات التي حصلنا عليها عند توليف المتحكم PID بالطرق التجريبية وباستخدام الخوارزمية ACO وذلك عند تأخيرات زمنية مختلفة وباستخدام توابع ملاءمة مختلفة لخوارزمية ACO. كما يوضح الجدول (5) بارامترات PID التي حصلنا عليها بعد التوليف باستخدام ACO، وكذلك القيم الأمثلية لتوابع الملاءمة التي حصلنا عليها من الخوارزمية، وذلك من أجل تأخيرات زمنية مختلفة 100، 200، 300 ميلي ثانية في نقل إشارة التحكم.

**الجدول 5:** قيم بارامترات PID عند التوليف باستخدام خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل ACO عند تأخيرات زمنية متفاوتة وباستخدام توابع ملاءمة مختلفة للخوارزمية.

نوع المتحكم	التأخير	$K_p$	$K_i$	$K_d$	ISE
ACO-PID	100ms	6.8	0.19	0.04	21.8
	200ms	6.8	0.01	0.01	24.15
	300ms	7.3	0.1	0.01	25.66
نوع المتحكم	التأخير	$K_p$	$K_i$	$K_d$	ITAE
ACO-PID	100ms	9.5	0.12	0.4	53.82
	200ms	9.8	1.7	0.01	49.7
	300ms	10	0.01	2.9	20.7
نوع المتحكم	التأخير	$K_p$	$K_i$	$K_d$	ITSE
ACO-PID	100ms	10	0.23	0.01	8.94
	200ms	10	0.1	0.9	10.55
	300ms	9.08	0.04	0.9	13.21
نوع المتحكم	التأخير	$K_p$	$K_i$	$K_d$	IAE
ACO-PID	100ms	10	0.07	0.04	27.4
	200ms	9.7	0.05	0.14	27.63
	300ms	9.6	0.13	1.24	29.34

وقمنا إجراء مقارنة مع دراسات سابقة تم من خلالها ضبط بارامترات متحكم PID في أنظمة تحكم مختلفة باستخدام طرق توليف تقليدية

**الجدول 3:** قيم بارامترات خوارزمية النمل المقترحة.

البارامتر	الرمز	القيمة
عدد التكرارات	$N_{iter}$	50
عدد النمل في المستعمرة (في التكرار الواحد)	NA	50
ثابت	$\alpha$	0.8
ثابت	$\beta$	0.2
احتمال تبخر الفيرون	$\rho$	0.7
عدد العقد لكل بارامتر	$N_{node}$	10000

## 5. النتائج والمناقشة

نلاحظ من خلال استخدام خوارزمية مستعمرات النمل ACO أننا استطعنا تقليل أثر التأخير الزمني الذي تصادفه إشارة التحكم في أنظمة التحكم الشبكية. وذلك بالمقارنة مع الاستجابة الناتجة في الشكل (8). ويوضح الجدول (4) والمنحنيات في الشكل (12) النتائج التي حصلنا عليها من أجل تأخيرات زمنية 100، 200، 300 ميلي ثانية على التوالي.

**الجدول 4:** مقارنة خصائص الاستجابة عند التوليف بالطرق التقليدية وبين التوليف باستخدام خوارزمية أمثلة مستعمرات النمل ACO في نظام تحكم شبكي (بوجود تأخير زمني).

نوع المتحكم	التأخير الزمني	زمن الصعود $T_r$ (ثانية)	التجاوز الأعظمي OS (%)	زمن الاستقرار $T_s$ (ثانية)	خطأ الحالة الثابتة $E_{ss}$ (%)
PID	100ms	0.76	65.34	7.71	0.07
	200ms	47.25	3.21	50.98	1955.08
	300ms	4.19	0.74	50.97	437.32
ACO-PID-	100ms	15.16	2.34	67.81	2.92
	200ms	16.56	0.07	47.92	1.37

وخوازميات أمثلة مختلفة. وقمنا بإدراج المقارنة من خلال الجدول (6). ومن خلال هذه المقارنة نستطيع مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع دراسات سابقة في مجال عملنا في هذه الورقة.

**الجدول 6:** مقارنة مع دراسات سابقة استخدمت خوارزميات التحكم الأمثل من أجل ضبط بارامترات المتحكم PID.

الدراسة السابقة	التأخير (ms)	طريقة التوليف	تابع الملاءمة	$T_r$ (ثانية)	OS (%)	$T_s$ (ثانية)	Ess (%)	نقاط التشابه مع البحث	النتائج
[3]	(متفاوت) 0.5-4	PID	-----	----	5.5-25	32-90	---	التحكم بمحرك تيار مستمر في نظام تحكم شبكي ذو تأخير زمني.	تفوق خوارزمية PSO-PID على طرق التوليف التقليدية، وعلى المنطق الضبابي. من حيث الحفاظ على زمن استقرار وتجاوز أعظمي أقل للاستجابة بوجود تأخيرات زمنية متفاوتة في نظام التحكم.
		PSO		----	2.6-2.8	6-9	----		
		FL		----	5.3-6.7	8-16	----		
[21]	(متفاوت) 100-300	PID	-----	47.25	3.21	50.98	1955.1	التحكم بمحرك تيار مستمر في نظام تحكم شبكي ذو تأخير زمني.	تفوقت كلتا الخوارزميتين على الطرق التقليدية (التوليف اليدوي). وتفوقت PSO-PID على GA-PID من أجل مؤشرات الأداء المختلفة، ومن أجل تأخيرات زمنية مختلفة.
		GA		12.12	0.55	35.54	0.06		
		PSO		3.22	0.005	0.92	0.03		
[7]	لا يوجد	ZN	ISE= 0.854	0.664	31.59	4.78	-----	خوارزمية ACO	تفوق ACO-PID على طريقة زيغلر نيكولس التقليدية وعلى GA-PID. وقدرتها على الوصول إلى الاستجابة الأفضل لنظام التحكم من خلال الحصول على بارامترات PID المثلى. وبالتالي الحصول على أداء أفضل لنظام التحكم.
		ACO	ISE = 0.77	0.7	0	3	-----		
		GA	ISE = 0.8	0.68	5.84	3.63	-----		
[14]	لا يوجد	IMC	ITAE=70.1	-----	-----	-----	-----	خوارزمية ACO	تفوق خوارزميات التحكم الأمثل على الطرق التقليدية (IMC، كوهن كون، ... وغيرها). حيث أن IMC أعطت أفضل نتيجة من بين الطرق التقليدية، وتفوقت عليها جميع طرق التحكم الأمثل. تفوق خوارزمية SFL-PID و- PSO PID على خوارزميات الأمثلة الأخرى من حيث تصغير قيمة تابع الملاءمة إلى أدنى قيمة.
		ACO	ITAE=30						
		GA	ITAE=15						
		BA	ITAE=7.9						
		PSO	ITAE=89						
		SFL	ITAE=7.8						

## 6. الاستنتاجات والتوصيات

### 6.1 الاستنتاجات

1. فعالية خوارزميات إيجاد الحل الأمثل مثل GA و PSO و ACO في تقليل الأثر السئ للتأخيرات الزمنية التي تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية عند نقل إشارة التحكم عبر الشبكة بالمقارنة مع طرق التحكم التقليدية، وذلك عند استخدامها في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID.

2. أعطت خوارزمية ACO قيم متقاربة لتتابع الملاءمة من أجل تأخيرات زمنية مختلفة، حيث نلاحظ أنه مع ازدياد التأخير الزمني في نقل إشارة التحكم حافظت الخوارزمية على قيم متقاربة لتتابع الملاءمة. حيث أنه في حالة استخدام ISE كتابع ملاءمة تراوحت قيمته بين 21.8 و 24.15 و 25.7 من أجل التأخيرات 100 و 200 و 300 ميلي ثانية على التوالي. وكذلك الأمر

نستنتج من المخططات في الشكل (12) والقيم الموضحة في الجدولين (4) و(5)، وبالمقارنة مع المخطط الموضح في الشكل (8) والذي يعبر عن استجابة نظام التحكم عند ضبط بارامترات المتحكم PID بالطريقة التجريبية، وبالمقارنة مع الدراسات السابقة في الجدول (6) ما يلي:

**الشكل 12:** استجابة نظام التحكم المعتمد على المتحكم ACO-PID عند تأخيرات زمنية 100، 200، 300 ميلي ثانية على التوالي.

## 6.2 التوصيات

1. نوصي باستخدام خوارزميات ذكاء أسراب أخرى، مثل خوارزمية مستعمرات النحل والذئب الرمادية والعنكب الاجتماعية وغيرها، من أجل توليف المتحكمات PID في أنظمة تحكم شبكية.
2. نوصي باستمرار البحث لإيجاد خوارزميات تحكم مبتكرة تقوم بدمج أكثر من تقنية لتوليف متحكمات PID في أنظمة تحكم مختلفة.
3. نوصي باستخدام توابع ملائمة مختلفة عن طريق وضع معادلات تجمع أكثر من مؤشر أداء بحيث تعطي نتائج أكثر دقة.
4. أيضاً نوصي بالتطرق إلى مشاكل أخرى تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية مثل مشكلة ضياع الرزم، ومشكلة الضجيج الذي تعاني منه قنوات الاتصال.

## الرموز

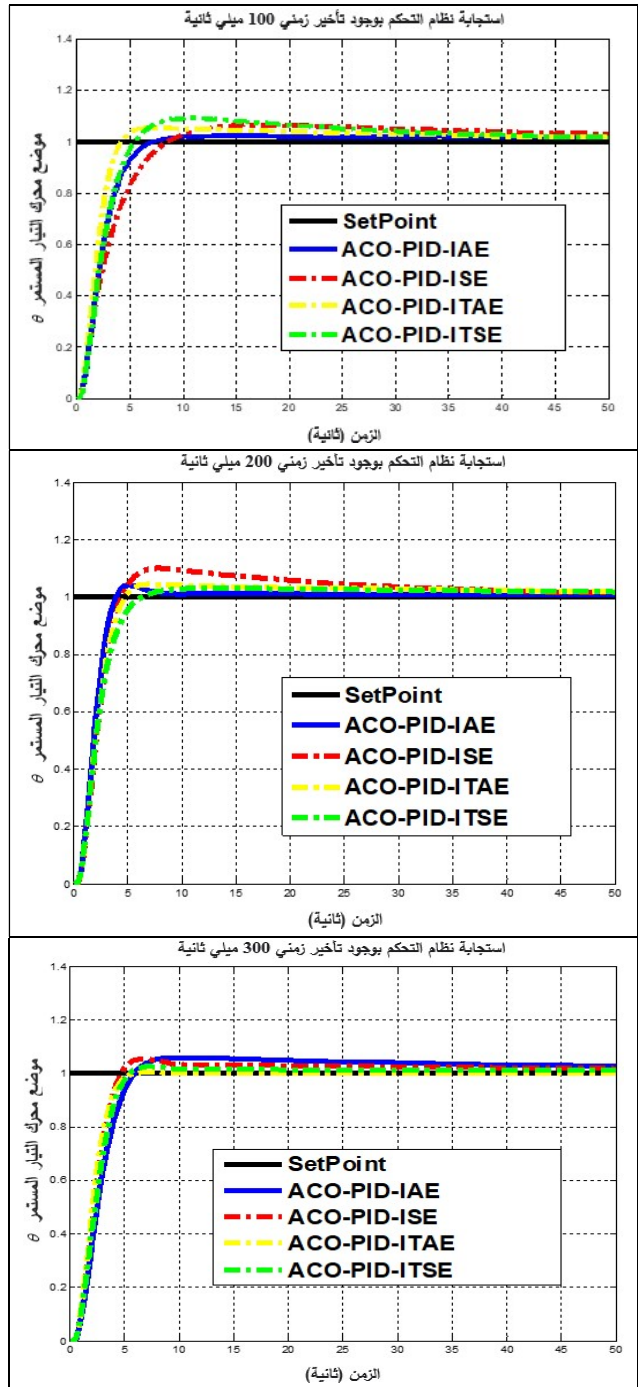
GA	Genetic Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
ACO	Ant Colony Optimization
BA	Bat Algorithm
SFL	Shuffled Frog Leaping
FL	Fuzzy Logic
ZN	Ziegler Nichols
IMC	Internal Model Control

## المصادر

- [1] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). PID controllers: theory, design, and tuning (Vol. 2). Research Triangle Park, NC: Instrument society of America.
- [2] Björk, C. J. (2018). PID tuning with Ant Colony Optimization (ACO): A framework for a step response based tuning algorithm.
- [3] 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.
- [4] Elamin, A. Y., Subha, N. A. M., Hamzah, N., & Ahmad, A. (2017, August). A Particle Swarm Optimization Based Predictive Controller for Delay Compensation in Networked Control Systems. In Asian Simulation Conference (pp. 417-431). Springer, Singapore.

بالنسبة للتابعين IAE وITSE، حيث كانت القيم الأمثلية لهما متقاربة. أما من أجل التابع ITAE فقد تراوحت قيمته بين 53.8 و49.7 و20.7 من أجل التأخيرات 100 و200 و300 على التوالي.

3. إن استخدام خوارزمية ACO من أجل توليف المتحكم PID حافظ نسبياً على خصائص استجابة نظام التحكم مع تغير التأخير الزمني. وبالمقارنة بين مؤشرات الأداء كانت خصائص الاستجابة الأفضل عند استخدام مؤشر الأداء IAE، حيث أعطت عند التأخير 200 ميلي ثانية، أصغر زمن صعود 8.43 ثانية مع أصغر زمن استقرار 0.92 ثانية، مع حافة تجاوز أعظمي صغيرة نسبياً 3.27% وخطأ حالة ثابتة 0.84% وتعتبر قيمة وسطية بين القيم المختلفة من أجل مؤشرات الأداء المختلفة عند التأخيرات الزمنية المختلفة. حيث تراوحت قيمة خطأ الحالة الثابتة بين 0.28% من أجل مؤشر الأداء ITAE عند التأخير 300 ميلي ثانية و2.92% من أجل مؤشر الأداء ISE عند التأخير 100 ميلي ثانية.





- [15] Saini, P. (2018). Ant Colony Optimization Application for Pid Controller Tuning.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] You, K., Xiao, N., & Xie, L. (2015). Overview of networked control systems. In *Analysis and Design of Networked Control Systems* (pp. 1-7). Springer, London.
- [19] Zaccarian, L. (2012). DC motors: dynamic model and control techniques. Lecture notes., roma, italy.
- [20] شيجا، ب، عبيد، & باسل. (2016). المنظم التناسبي التكامل 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).
- [21] مخول، م، 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).
- [5] Gautam, M. K., Pati, A., Banerjee, R., & Kumar, S. (2020). Design and Determination of Various Methods of PID Controller for Networked Control Systems.
- [6] Gupta, R. A., & Chow, M. Y. (2008). Overview of networked control systems. In *Networked Control Systems* (pp. 1-23). Springer, London.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] John Nilsson, *Real-Time Control Systems With Delays*, PhD. Thesis, 1998.
- [11] M. Dorigo, "Optimization, learning and natural algorithms", PhD thesis, Milan: Polytechnic University of Milan, 1992.
- [12] 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.
- [13] Raghavan, S. (2005). Digital control for speed and position of a DC motor. Texas A&M University-Kingsville.
- [14] 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.

# Optimal Tuning of PID controller using ant colony optimization algorithm in a networked control system

Mary Michael Albahlit<sup>1</sup> \*, Mikhael Salim Makhoul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of automation Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.

<sup>2</sup>Department of automation Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria. [gmail.com@](mailto:mary.albahlit@gmail.com)

\*Corresponding author: Mary Albahlit, [mary.albahlit@gmail.com](mailto:mary.albahlit@gmail.com)

Published online: 30 September 2022

**Abstract-** In this paper, we used the Ant Colony Optimization algorithm (ACO) for tuning PID controller in order to use this controller in control processes over networks, which usually suffers from time delay problem which affects noticeably the control signal quality, and so the response quality. We employed the controller in a position DC motor control system with taking in consideration the presence of different time delays when transferring the control signal. The results showed the effectiveness of ACO in tuning PID controller to reduce the effect of time delays on response quality. We modeled a DC motor control system using the Matlab / Simulink environment. The results showed the effectiveness of ACO as a method of tuning PID to reduce the effect of time delays on response quality when comparing with traditional experimental methods. We used the performance criterions that used in evaluating control systems performance as cost functions for ACO. The ACO gave the best response of the proposed control system when using Integral Absolute Error as a cost function. With 200 ms of delay, ACO gave the least rise time 8.43 seconds with the least settling time 0.92 seconds, with a relatively small overshoot 3.27%. It also gave close values of each performance criterion, at different time delays 100, 200, 300 ms.

**Keywords** — "PID, PID tuning, DC motor, Network Control System, NCS, ACO, Time Delay, Matlab/Simulink"