

## الضبط الأمثل لبارامترات المتحكم PID لمعالجة أثر التأخيرات الزمنية في أنظمة التحكم الشبكية

\* أ.د.م. مخائيل سليم مخول

\*\* م. ماري ميشيل البهايط

(تاريخ الإيداع 20 / 7 / 2020 . قُبل للنشر 19 / 11 / 2020)

### □ الملخص □

قمنا في هذا البحث بتطبيق خوارزميات إيجاد الحل الأمثل من أجل ضبط بارامترات المتحكم PID وذلك من أجل 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. استخدمنا خوارزميتين هما الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm, GA)، وخوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب ( Particle Swarm Optimization, PSO). وقمنا بإجراء مقارنة بين أدائهما من خلال توظيفهما في عملية التحكم بموضع محرك تيار مستمر مع الأخذ بعين الاعتبار لوجود تأخيرات زمنية متفاوتة في نقل إشارة التحكم. وأظهرت النتائج فعالية خوارزميات التحكم الأمثل في عملية ضبط بارامترات المتحكم PID للحد من أثر التأخيرات الزمنية على جودة الاستجابة. أعطت كلتا الخوارزميتين قيم متقاربة لتابع الملاءمة من أجل تأخيرات زمنية مختلفة. خوارزمية PSO كانت ذات استقرار أسرع بشكل ملحوظ من الخوارزمية الجينية، حيث أعطت زمن صعود بحدود 2.5 ثانية من أجل التأخيرات الثلاثة (300، 200، 100) ميلي ثانية، بينما تراوحت قيمته في حالة الخوارزمية الجينية بين 6.3 و 14.8 ثانية، أيضاً أعطت PSO زمن استقرار (5.3، 4.9، 8.9) ثانية مقابل (30.8، 38.7، 33.6) ثانية للجينية من أجل قيم التأخير الثلاثة على التوالي، مع تجاوز أعظمي صغير نسبياً. وقمنا بنمذجة نظام التحكم بموضع محرك تيار مستمر باستخدام بيئة ماتلاب/سيمولينك.

**الكلمات المفتاحية :** المتحكم التناسبي التكامل التفاضلي، نظام تحكم شبكي، أمثلة جزيئات الأسراب، الخوارزمية الجينية، التأخير الزمني، محرك تيار مستمر، ماتلاب، سيمولينك.

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

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

## Optimal setting of PID controller parameters to manipulate the effect of time delays in network control systems

Prof.Eng. Mikhail Salim Makhoul\*  
Eng. Mary Albahlit\*\*

(Received 20/ 7/ 2020 . Accepted 19/ 11/ 2020 )

### □ ABSTRACT □

In this research, we used the algorithms that find the optimal solution 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 used two algorithms, GA and PSO. We did a comparison between their performance by employing them 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 optimal control algorithms in tuning PID controller to reduce the effect of time delays on response quality. Both algorithms gave close values to the fitness function for different time delays. PSO was significantly faster stable than GA, as it gave less settling time (8.9, 4.9, 5.3)seconds against (33.6, 38.7, 30.8) seconds for GA at different time delays (100, 200, 300) ms, respectively, with a relatively small overshoot. We modeled a DC motor control system using the Matlab / Simulink environment.

**Keywords:** PID, PID tuning, DC motor, Network Control System, NCS, PSO, GA, Time Delay, Matlab/Simulink.

---

\* Professor in Technical Engineering Faculty, Industrial Automation Department.

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

## مقدمة

في العقود الأخيرة، انتشر استخدام الشبكات الحاسوبية بشكل واسع في مجالات العمل المختلفة، لتسهيل التواصل بين الأشخاص ومحطات العمل وحتى بين الشركات الموجودة في بلدان مختلفة [1]. من جهة أخرى تشهد نظرية التحكم تطوراً كبيراً، وأصبح من المُلحّ تطوير حلقات التحكم التقليدية لتعمل عبر الشبكة. ظهرت أنظمة التحكم الشبكية (Networked Control Systems, NCSs) التي تفصل بين العملية والمتحكم. وقد تم إجراء العديد من الأبحاث حول هذه الأنظمة، حيث تمت دراسة طرق مختلفة لتصميمها، وكيفية الحفاظ على استقرارها وقوتها [1]. ولكن، تعاني هذه الأنظمة من مشكلة التأخير الزمني الناتج عن إرسال واستقبال رزم البيانات عبر خطوط الاتصال، وهذا التأخير لديه عادة طبيعة عشوائية [2]. لذلك كان لا بد من تطوير حلقات التحكم التقليدية لتأخذ بعين الاعتبار التأخيرات الزمنية أثناء عمليات نقل البيانات عبر الشبكة. مما دفع الأبحاث إلى التطرق إلى خوارزميات جديدة لتصميم وتوليف المتحكمات بحيث تتناسب مع طبيعة الشبكة والتأخيرات الزمنية الحاصلة فيها [3,4].

يعتبر المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (Proportional Integral Derivative, PID) المتحكم الأكثر شهرة في المجال الصناعي، وذلك نظراً لبساطة بنيته وأدائه المستقر في ظروف التشغيل المختلفة. وقد تم استخدامه على نطاق واسع في أنظمة التحكم الشبكية حيث تم إيجاد طرق توليف جديدة لتتناسب مع التأخيرات الزمنية المتفاوتة [3,4,5]. وقد أثبتت طرق التوليف المعتمدة على التحكم الأمثل للمتحكم PID جدارتها بالمقارنة مع طرق التوليف التقليدية، ولاسيما في أنظمة التحكم الشبكية [6]. 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 مستعمرات النمل والنحلوغيرها، والتي تم استخدامها من قبل الباحثين في هذا المجال [7,8,9]. كما قام باحثون باستخدام المنطق الضبابي لتصميم متحكم PID ضبابي [9,10]، ولجأ آخرون إلى الشبكات العصبونية [11] 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 كل تقنية على حدى.

فمن خلال هذا البحث بإجراء عملية التوليف للمتحكم PID باستخدام خوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب والخوارزمية الجينية. واستخدمنا هذه الطرق من أجل التحكم بموضع محرك تيار مستمر، بوجود تأخيرات زمنية متفاوتة في نقل إشارة التحكم، ومن ثم قمنا بمقارنة النتائج. واستخدمنا بيئة ماتلاب/سيمبولينك من أجل محاكاة النظام المقترح.

## أهمية البحث وأهدافه

يهدف هذا البحث إلى استخدام طرق التحكم الأمثل من أجل توليف المتحكم PID في نظام تحكم شبكي. وإظهار أهمية استخدام الخوارزميات الذكية كخوارزمية جزيئات الأسراب والخوارزمية الجينية في التغلب على أثر التأخيرات الزمنية التي تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية. واستخدام الطرق المقترحة من أجل التحكم بموضع محرك تيار مستمر، ومقارنة النتائج.

## طرائق البحث ومواده

### 1. المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID)

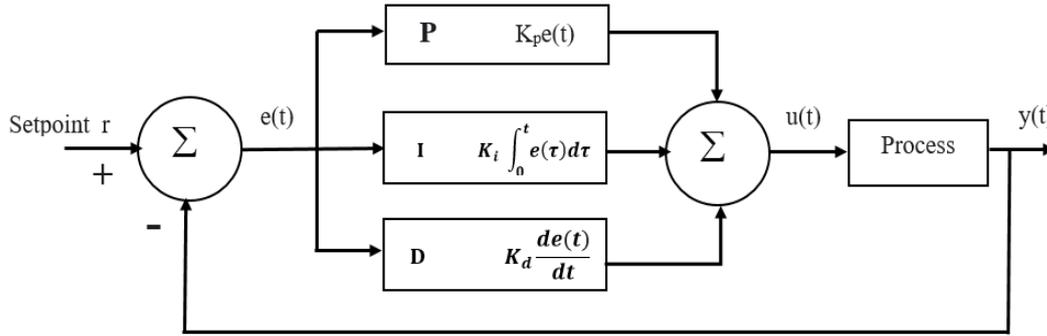
المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي هو آلية حلقة تحكم مغلقة مستخدمة بشكل واسع في أنظمة التحكم الصناعية. يعتمد هذا المتحكم بدرجة كبيرة على قياس نسبة الخطأ بين قيمة ضبط مرغوبة (Setpoint) والقيمة الفعلية (Actual Value) التي يتم قياسها من قبل العملية. الخطأ هو ناتج طرح قيمة الضبط من القيمة الفعلية كما يلي:

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

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

#### • آلية عمل الPID:

يوضح الشكل التالي آلية عمل المتحكم PID [13]:



الشكل (1): مخطط صندوقي تفصيلي يوضح آلية 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:

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.

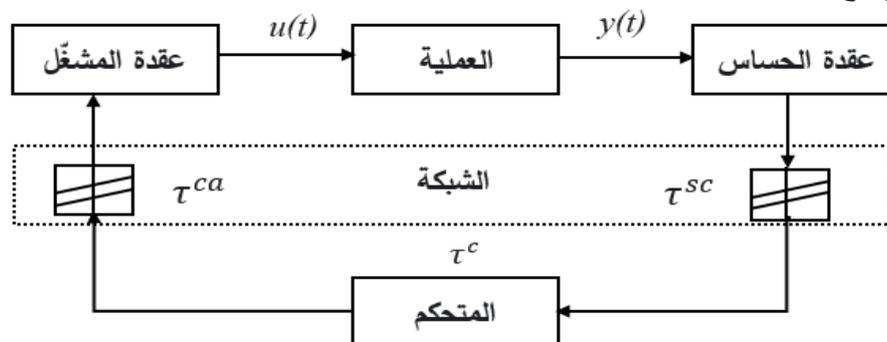
لذلك نبحث عن التسوية التالية في أنظمة التحكم: استقرار مقبول وسرعة متوسطة للاستجابة [14].

## 2. نظام التحكم الشبكي (Network Control System, NCS)

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

### زمن التأخير في نظام التحكم الشبكي:

يوضح الشكل (2)، نظام تحكم شبكي مكون من منشأة، حساس، مشغل، متحكم وشبكة. حيث يتصل المتحكم المركزي مع الحساس والمشغل عبر الشبكة [15].



الشكل (2): التأخير الزمني في نظام تحكم شبكي.

يوجد ثلاثة أنواع للتأخيرات في أنظمة التحكم الشبكية [15]:

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

2. زمن الحوسبة في المتحكم  $\tau^c$ .

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

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.

### 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:

يَحْكُمُ عمل محرك التيار المستمر أمران وهما المميزات الكهربائية والمميزات الميكانيكية [16]. يمكن انطلاقاً من هذه المميزات الوصول إلى تابع النقل لمحرك التيار المستمر، كما في المعادلة (2):

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

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.

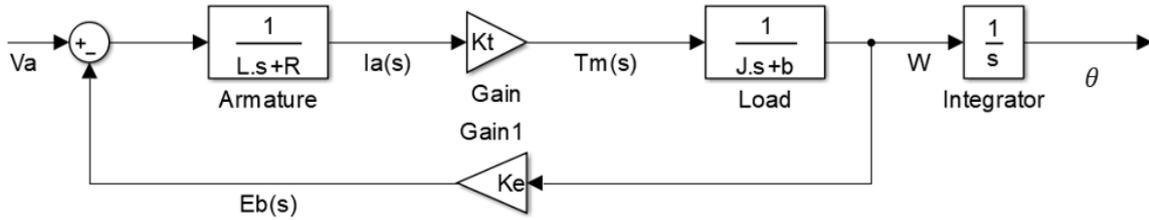
$b$ : محصلة عوامل الاحتكاك.

$K_e$ : ثابت خاص بالمحرك.

ومن أجل الحصول على موضع المحرك  $\theta$  نقوم بمكاملة السرعة  $w$  [17]. 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 نتائج 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.

#### 4. خوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب (Particle Swarm Optimization, PSO):

تم تطوير خوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب (Particle Swarm Optimization, PSO) من قبل كينيدي وإبرهاردتفي عام 1955، وقد لاحظا السلوك الاجتماعي الذي يلهم حركة الأحياء من أسراب الطيور أو الأسماك [18]. 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.

#### • الحل الأفضل العام لخوارزمية أمثلة جزيئات 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 محددة  $X_i$  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 العلاقة التالية [18]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (4)$$

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 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 التالية [18]:

$$v_i^{t+1} = v_i^t + c_1 r_1^t [P_{best,i}^t - x_i^t] + c_2 r_2^t [G_{best} - x_i^t] \quad (5)$$

حيث:

$v_i^t$  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.

$r_1^t$  و  $r_2^t$  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 أحسن مكان داخل السرب.

## 5. الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm, GA):

تم تطوير الخوارزمية الجينية من قبل هولاند من جامعة ميشيغان في عام 1975. وقد شرح أساسيات هذه الخوارزمية في كتاب باسم "Adaptation in natural and artificial systems" [19]. وكان الباحث الأول الذي استخدم قواعد التطور لحل مشاكل الأمثلة. ترتبط الخوارزمية الجينية بالطبيعة من خلال القانون الأساسي للتطور والذي يتضمن مايلي:

1. البقاء للأقوى (داروين): لكل كائن بشري كروموزومان (صبغيان) لكل منهما 23 مورثة (جين) ونتيجة التزاوج تنشأ الأجيال الجديدة).
2. التغيير في الأنواع يستوجب تغيرات في الجينات وهذا يتم عبر التزاوج و / أو الطفرات الوراثية.

### • آلية عمل الخوارزمية الجينية [19،20]:

أولاً: توليد تجمع سكاني أولي (Initial Population Generation):

تبدأ أي مسألة في الخوارزميات الجينية بتوليد تجمع عشوائي مكون من عدد ما من الكروموزومات، إن هذه العملية عشوائية بالمطلق، حيث يمكن اختيار أية عناصر من فضاء الحل ووضعها في التجمع البدائي. إن الكروموزوم هو حل من حلول المسألة وعدد عناصره أي الجينات تحدد بحسب فضاء الحل، أما عدد الكروموزومات في كل تجمع سكاني فيخضع لطبيعة المسألة المطروحة. يمكن القول بأن المرحلة الأولى تتضمن عملية تعريف فضاء البحث وعدد أفراد التجمع أو ما ندعوه حجم التجمع السكاني (Population Size). وتتم عملية تشفير الكروموزومات بطريقة تدعى التشفير الثنائي (Binary encoding). حيث كل كروموزوم هو عبارة عن سلسلة من البتات 0 أو 1.

ثانياً: اختيار تابع الملاءمة (Fitness Function):

في هذه المرحلة يجب اختيار تابع الملاءمة وهو التابع الذي سيحدد مدى صلاحية كل كروموزوم، أي مدى فعالية كل حل وإمكانية بقاءه في الأجيال التالية، أو إمكانية جعله أباً في عملية توليد الأبناء الجدد. هي الدالة التي تعطي نتيجتها احتمال دخول فرد ما في الاختيار وتوريث خاصياته. ويختلف تابع الملاءمة هذا باختلاف المسألة المطروحة وغالباً ما يمكن اعتباره يسعى لـ MAX أو لـ MIN.

ثالثاً: توليد جيل جديد (New Population Generation):

نهدف لإيجاد الجيل التالي المكون من مجموعة كروموزومات، من خلال القيام بثلاث عمليات أساسية، هي المراحل الرئيسية في الخوارزميات الجينية وهي: الاختيار، العبور، والطفرة.

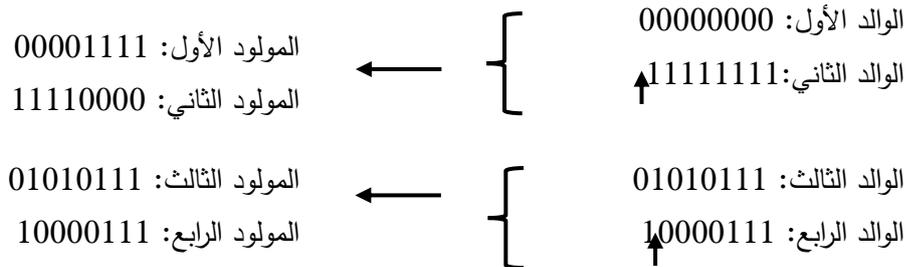
1. اختيار الآباء (Parent Selection):

الفكرة الرئيسية من عملية الاختيار هي اختيار الطول الجيدة لتدخل في عملية إنتاج الجيل التالي والابتعاد عن الحلول السيئة، وهذا هو صلب عمل الخوارزميات الجينية القائم على مبدأ البقاء للأفضل. بالتالي يجب ألا نتخلى عن الحلول المثلى في تجمع ما وبالتصالب مع الكروموزومات الأخرى يتولد الجيل الجديد، وبذلك نضمن أن الحل الأمثل في الجيل الجديد سيكون أفضل من الحل الأمثل في الجيل السابق أو في أسوأ الأحوال نفسه.

2. العبور أو التصالب (Crossover):

تعد عملية العبور من العمليات المهمة في الخوارزمية الجينية. ومما هو جدير بالذكر أن العبور يتم وفقاً لاحتمال معين هو احتمال العبور (crossover probability) وهو عامل يحدد احتمال حدوث العبور حيث في حال العامل 100%، يتم إنتاج كامل النسل من العبور. وفي حال كان 0%، يتم إنتاج الجيل الجديد من نسخ مطابقة للجيل القديم ويحدد ذلك بحسب طبيعة المسألة.

بعد أن يتم تحديد نقطة التبادل عشوائياً، يتبادل الوالدان جزءاً من سلسلة أرقامهما الثنائية الواقع بعد نقطة العبور. مثال على ذلك:



### 3. الطفرات (Mutations):

هيا المرحلة الأخيرة من سلسلة العمليات التكرارية التي تسهم بشكل جيد في الوصول بالحل الآمن بسرعة. تنفيذ الطفرة في إيجاد حلول جديدة كلياً لا تنتج بشكل نظامي من خلال عملية التصالب، حيث تلجأ الطفرة إلى إحداث تغيير مؤثر على الكروموزوم يساهم في تغيير ملامحه بشكل كبير. ولا تحدث الطفرة إلا بنسبة ضئيلة جداً (1%)، يوجد 3 طرق رئيسية للطفرات هي:

#### - طريقة القلب (Inverting) Flipping:

تكونا الطفرة عبارة عن عكس أحد الجينات (واحد أو أكثر) ضمن الكروموزوم، أي من الصفر إلى الواحد أو العكس. ومن الممكن إجراء عملية التغيير على عدد من بتات (bits) الكروموزوم وليس على (bit) واحد فقط.

#### - التبديل (Interchanging):

اختيار مواقع عشوائية يتم تغييرها من 0 إلى 1 وبالعكس وذلك بتبديل الجينات المختلفة في الكروموزوم.

#### - العكس (Reversing):

يتم اختيار موقع عشوائي ويتم تغيير البتات التي تليه. فمثلاً يمكن التبديل من السابع وحتى نهاية الكروموزوم.

#### رابعاً: القبول (Accepting):

تعني قبول نواتج العمليات السابقة، أي لضمان أن كل الحلول تنتمي لمجال البحث.

#### خامساً: الاستبدال (replace):

نهاية دورة التزاوج تتم بالاستبدال عند تشكيل كروموزومين أبناء من كروموزومين آباء فلا يعود الأربعة للجمع الجديد بل يتم التبديل وفق منهج للمحافظة على الجيل يدعى تحديث الجيل. حيث يتم في تحديث الجيل إنتاج  $n$  ابن من تجمع بحجم  $n$  ويتم استبدال جميع الآباء بالأبناء أي أن الفرد الجديد ينتج من جيل واحد فقط.

#### سادساً: الاختبار (Test):

هنا يتم اختبار شرط محدد لمعرفة هل تتوقف الخوارزمية عن العمل أو أنها ستتابع وبالتالي تعود للخطوة الثانية وتختبر الكروموزومات الجديدة، وهناك عدة شروط للتوقف نذكر منها:

1. الوصول إلى حل أمثلي ممكن للمسألة المطروحة.
2. الوصول إلى متوسط ملاءمة أمثلي معين سلفاً لأفراد المجتمع.
3. الوصول إلى عدد أعظمي من دورات أو كلفة أو زمن معين الخوارزمية الجينية حدده.
4. عدم تحسن نتائج الخوارزمية الجينية مع مرور الأجيال عندها نوقف الخوارزمية الجينية ونلجأ إلى تغيير في متحولاتها وإعادة توليد الأجيال من جديد.

## النتائج والمناقشة

نمذجة النظام باستخدام ماتلاب/سيمبوليك:

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

للمتحكم PID:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

• ذكرنا في الفقرة الخاصة بمحرك التيار المستمر كيفية نمذجة محرك التيار المستمر في سيمبوليك

ماتلاب.

• الآن ننتقل إلى نمذجة التأخير الزمني، الذي سنقوم من خلال هذا البحث بالعمل على تقليل تأثيره

على إشارة التحكم في النظام. سنقوم بنمذجة التأخير الزمني باستخدام صندوق النقل ذو التأخير الزمني

(Transport Delay Block) الموضح في الشكل (4)، وهو يقوم بتأخير ظهور إشارة دخله بمقدار محدد

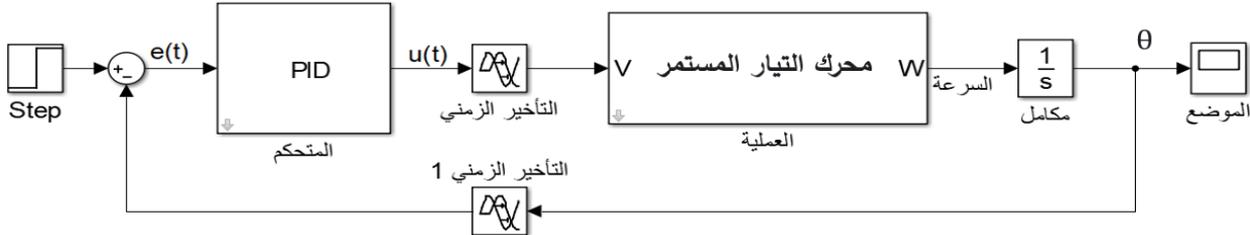
من الزمن.



التأخير الزمني

الشكل (4): صندوق التأخير الزمني في سيمبوليك.

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



الشكل (5): 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. وقبل البدء ببرمجة وتطبيق الطرق المختلفة لضبط بارامترات الـ PID، قمنا

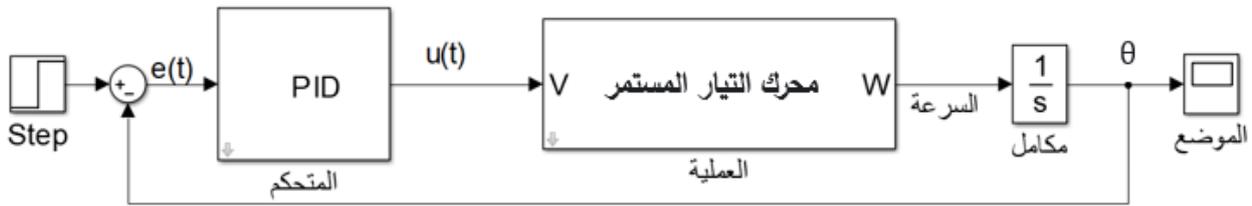
بإعطاء قيم تجريبية لبارامترات الـ PID (أي باستخدام التوليف اليدوي)، كما يلي:  $K_p=50$ ,  $K_i=40$ ,  $K_d=20$ . كما قمنا

بتحديد بارامترات محرك التيار المستمر كما في الجدول (1):

الجدول (1) بارامترات محرك التيار المستمر

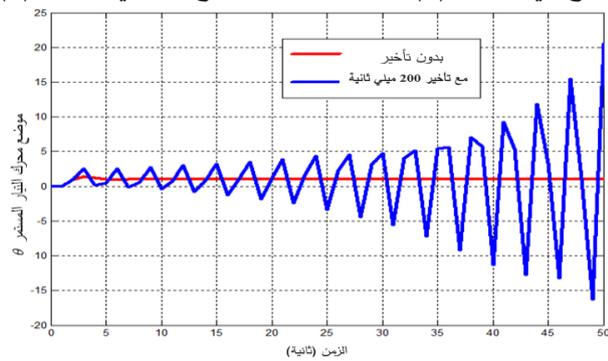
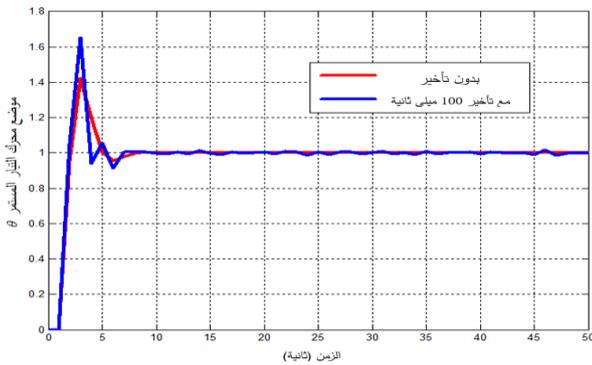
R	2ohm
L	0.7 henry
B	0.2
$K_e$	0.02
$K_t$	0.02
J	0.05

في البداية اختبرنا استجابة النظام في حال عدم وجود تأخير زمني في نقل إشارة التحكم، أفي حال النموذج من الشكل (6).



الشكل (6): 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 (5). فكانت إشارة الموضع كما في الشكل (7).



الشكل (7): التغير الكبير في الاستجابة عند مصادفة إشارة التحكم لتأخير زمني.

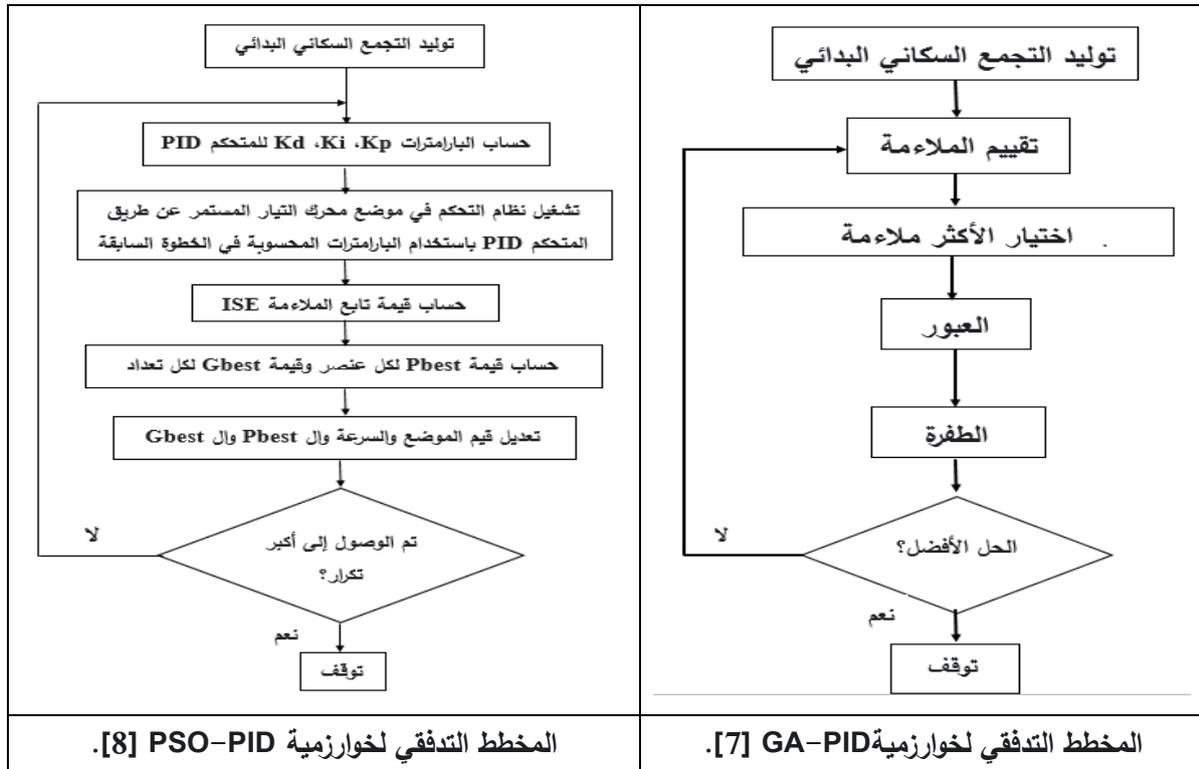
نلاحظ التغير الكبير في شكل الاستجابة والذي تسبب به التأخير الزمني. ونلاحظ أن زيادة التأخير الزمني تزيد من تشوه الاستجابة حيث تؤدي إلى تذبذب كبير وعدم استقرار إشارة خرج نظام التحكم. من أجل توليف المتحكم PID باستخدام طرق الأمثلة، يتم توليد تعداد سكاني لكل خوارزمية مع عدد للأجيال يعتبر كافياً (بالاعتماد على دراسات أولية). بعد ذلك سيكون الفرد الأفضل في التعداد هو ربح المتحكم. وقد اعتمدنا في هذه الدراسة على التعداد السكاني 20 فرد، وعدد أجيال 50 للخوارزميتين. يمكن زيادة عدد الأجيال والتعداد السكاني، ولكن عندها يزداد الوقت اللازم لتنفيذ الخوارزميات.

من أجل مقارنة النتائج التي حصلنا عليها من كل طريقة، 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 بارامترات 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. مؤشر الأداء الذي اعتمدنا عليه في هذا البحث هو تكامل مربع الخطأ (Integral Square Error, ISE). ويعطى بالمعادلة (7):

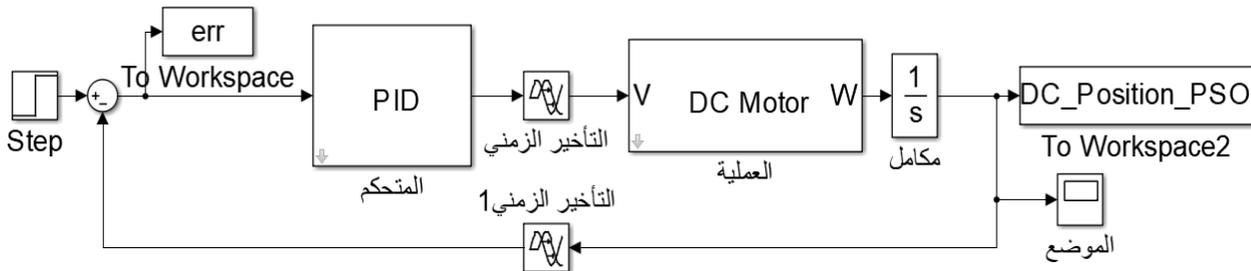
$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (7)$$

وهو تابع للملاءمة الذي تسعى الخوارزمية إلى إيجاد القيمة الصغرى له. والتي سنتعطينا بالمقابل البارامترات الأمثلية للمتحكم PID.

وقد قمنا ببرمجة كل خوارزمية على حدى في ملف mfile وفق المخطط التدفقي الموضح في الشكل (8) لكل خوارزمية. وقمنا بربط الملف مع نموذج سيميولينك الموضح في الشكل (9)، 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 هي إشارة موضع محرك التيار المستمر  $\theta$ . لئتم تطبيق الخوارزمية التي تعمل بشكل تكراري، بحيث يتم حساب قيمة تابع الملاءمة ISE الموافقة لقيمة الخطأ  $e(t)$  المحسوبة من قبل النموذج. وهكذا حتى نحصل على قيم بارامترات PID الأمثلية التي تعطى أصغر قيمة لمؤشر الأداء وبالتالي الاستجابة الأمثلية المرغوبة للنظام.



الشكل (8): المخطط التدفقي لخوارزميات PSO، GA.



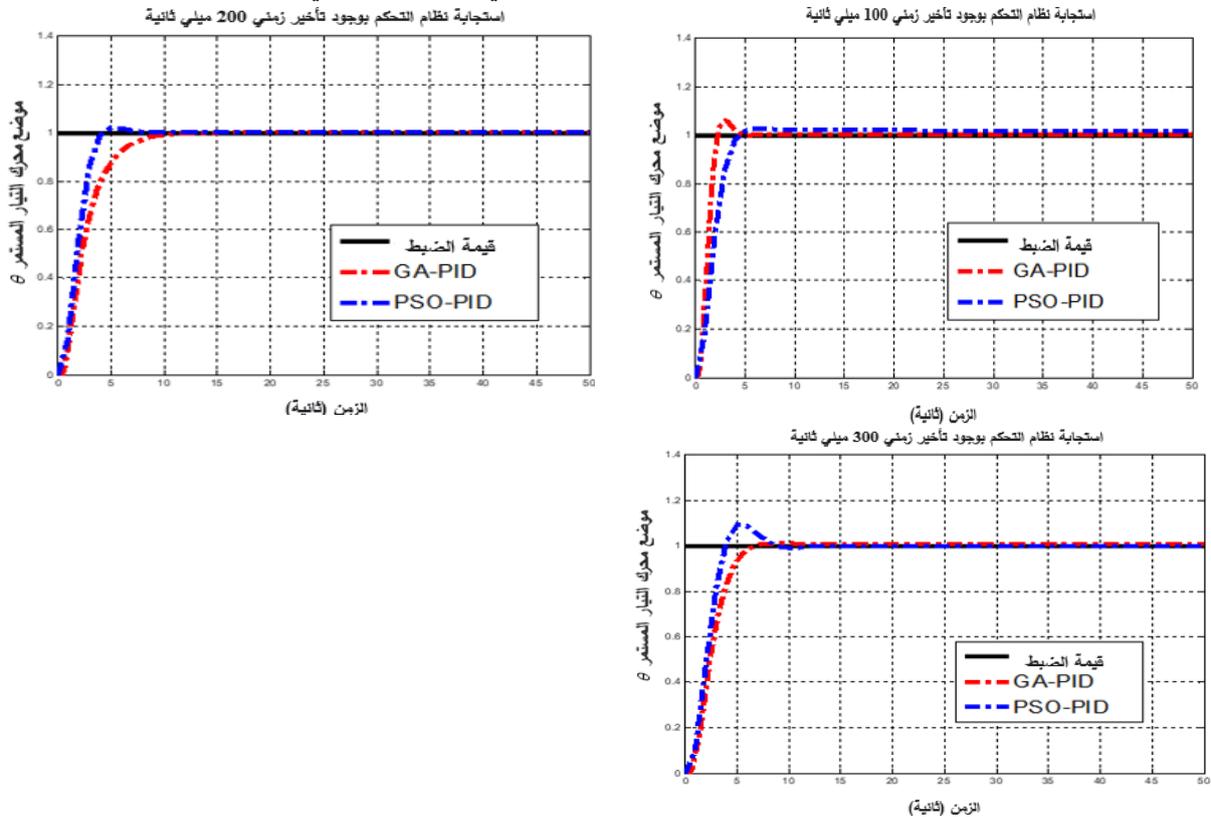
الشكل (9): نموذج سيميولينك لنظام التحكم بمحرك تيار مستمر عن طريق متحكم PID بوجود تأخير زمني عند نقل إشارة التحكم من المتحكم إلى المحرك مع تمرير قيمة الخطأ كمتحول عام err من أجل حساب قيمة تابع الملاءمة ISE لخوارزمية PSO.

## الاستنتاجات والتوصيات

### -الاستنتاجات

نلاحظ من خلال استخدام خوارزميات التحكم الأمثل PSO، GA أننا استطعنا تقليل أثر التأخير الزمني الذي تصادفه إشارة التحكم في أنظمة التحكم الشبكية. وذلك بالمقارنة مع الاستجابة الناتجة في الشكل (7). ويوضح الجدول (2) والمنحنيات في الشكل (10) مقارنة مفصلة بين النتائج والتي قمنا باختبارها من أجل تأخيرات زمنية 100، 200، 300 ميلي ثانية على التوالي.

حيث يوضح الجدول (2) خصائص كل من الاستجابات التي حصلنا عليها عند توليف المتحكم PID بالطرق التجريبية وباستخدام الخوارزميتين GA و PSO. كما يوضح بارامترات PID التي حصلنا عليها بعد التوليف باستخدام PSO و GA، وكذلك القيمة الأمثلية لتابع الملاءمة والتي حصلنا عليها من كل خوارزمية، وذلك من أجل تأخيرات زمنية مختلفة 100، 200، 300 ميلي ثانية على التوالي.



الشكل (10): مقارنة الاستجابة للخوارزميتين GA، PSO عند تأخيرات زمنية 100، 200، 300 ميلي ثانية على التوالي.

الجدول (2) مقارنة خصائص الاستجابة وبارامترات PID عند التوليف بالطرق التقليدية و بين التوليف باستخدام الخوارزميات الذكية PSO و GA في نظام تحكم شبكي (بوجود تأخير زمني).

نوع المتحكم	التأخير الزمني	زمن الصعود، ت (ثانية)	التجاوز الأعظمي	زمن الاستقرار، ت (ثانية)	خطأ الحالة الثابتة	ISE	K <sub>p</sub>	K <sub>i</sub>	K <sub>d</sub>
PID	100ms	0.7600	65.3400	7.7114	50.7023	-	50	40	20
	200ms	47.2513	3.2123	50.9800	2.2141e+03	-	50	40	20
	300ms	4.1874	0.7353	50.9734	2.5111e+15	-	50	40	20
GA-PID	100ms	6.310	5.7921	30.8685	98.0591	17.767	18.639	0.0293	3.403
	200ms	14.8348	0.0079	38.7540	75.1062	19.298	7.608	0.0045	3.0133
	300ms	10.5685	0.2138	33.6037	67.8403	20.043	6.8924	0.021	0.445
PSO-PID	100ms	2.908	1.2224	5.3852	49.7362	19.531	9.3426	0.0348	-0.168
	200ms	2.642	1.8621	4.9439	48.3341	19.785	9.881	-0.001	0.857
	300ms	2.4130	9.3350	8.9368	48.3523	21.781	8.962	0.021	-1.824

نستنتج من المخططات في الشكل (11) والقيم الموضحة في الجدول (2)، وبالمقارنة مع المخطط الموضح في الشكل (7) والذي يعبر عن استجابة نظام التحكم عند ضبط بارامترات المتحكم PID بالطريقة التجريبية، مايلي:

1. فعالية خوارزميات التحكم الأمثل في تقليل الأثر السيء للتأخيرات الزمنية التي تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية عند نقل إشارة التحكم عبر الشبكة بالمقارنة مع طرق التحكم التقليدية.
2. أعطت كلتا الخوارزميتين قيم متقاربة لتابع الملاءمة ISE من أجل تأخيرات زمنية مختلفة حيث تراوحت قيم ISE من أجل كلتا الخوارزميتين بين 17.7 و 21.7 وذلك من أجل قيم التأخيرات الزمنية الثلاثة.
3. خوارزمية أمثلة جزيئات الأسراب كانت ذات استقرار أسرع بشكل ملحوظ من الخوارزمية الجينية، حيث أعطت زمن صعود بحدود 2.5 ثانية من أجل التأخيرات الثلاثة، بينما تراوحت قيمته في حالة الخوارزمية الجينية بين 6.3 و 14.8 ثانية، وزمن استقرار أصغر بين 4.9 و 8.9 ثانية من أجل قيم التأخير الثلاثة بينما قيمه في حالة الخوارزمية الجينية بين 30.87 و 38.75 ثانية، مع تجاوز أعظمي صغير نسبياً لكلا الخوارزميتين إلا أن PSO عند التأخير 300 ميلي ثانية أعطت تجاوز أعظمي أكبر من الجينية.

#### -التوصيات-

1. نوصي باستخدام خوارزميات تحكم أمثل أخرى، مثل خوارزميات مستعمرات النمل والنحل من أجل توليف المتحكمات PID في أنظمة تحكم شبكية.
2. نوصي باستمرار البحث لإيجاد خوارزميات تحكم مبتكرة لتوليف 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.
4. أيضاً نوصي بالتطرق إلى مشاكل أخرى تعاني منها أنظمة التحكم الشبكية مثل مشكلة ضياع الرزم، والضجيج الذي تعاني منه قنوات الاتصال.

## المراجع

- [1] Gupta, R. A., & Chow, M. Y. (2008). *Overview of networked control systems. In Networked Control Systems (pp. 1-23). Springer, London.*
- [2] 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.*
- [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] 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.*
- [6] Gautam, M. K., Pati, A., Banerjee, R., & Kumar, S. (2020). *Design and Determination of Various Methods of PID Controller for Networked Control Systems.*
- [7] 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.*
- [8] 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.*
- [9] خضور، رامي. (2018). مقارنة بين تقنيتي PID-PSO و Fuzzy-PSO للتحكم بزواوية نواس معكوس. مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية \_ سلسلة العلوم الهندسية، 2(1).
- [10] 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.*
- [11] 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.*
- [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] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning (Vol. 2). Research Triangle Park, NC: Instrument society of America.*
- [14] شيجا، بلال، عبيد، & باسل. (2016). المنظم التناسبي التكاملي 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).
- [15] John Nilsson, *Real-Time Control Systems With Delays, PhD. Thesis, 1998.*
- [16] Zaccarian, L. (2012). *DC motors: dynamic model and control techniques. Lecture notes., roma, italy.*

[17]Raghavan, S. (2005). *Digital control for speed and position of a DC motor.* Texas A&M University-Kingsville.

[18] R. Eberhart, "Kennedy. Particle swarm optimization," in *Proceeding IEEE Inter Conference on Neural Networks, Perth, Australia, Piscataway, 1995, vol. 4, pp*

[19] H. John, *Adaptation in natural and artificial systems.* MIT Press, Cambridge, MA, 1992.

[20] مسعود، رشا، الموالي، مصطفى، العقلة، & عيسى. (2013). موازنة نموذج جسم الإنسان باستخدام تقنية تحكم معتمد على متحكم PID ضُبِطت بارامتراته عن طريق الخوارزمية الجينية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، 29(1).