

طراحی کنترلر PID مرتبه کسری برای کنترل سطح سیستم سه مخزن براساس الگوریتم بهینه سازی فاخته بهبود یافته

میثم قیصرنژاد^(۱) - حامد مجللی^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - اتاق کنترل، مجتمع ذوب آهن خزر، رشت، ایران

(۲) استادیار - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۱۳

خلاصه: کنترلر PID مرتبه کسری (FOPID) تعمیم یافته کنترلر PID استاندارد با استفاده از حسابان کسری می‌باشد. در مقایسه با کنترلر PID استاندارد، دو متغیر قابل تنظیم "مشتق کسری" و "انتگرال کسری" به کنترلر PID اضافه می‌شوند. سیستم سه مخزن یک فرآیند چند متغیره غیر خطی است که یک نمونه اولیه خوب از فرآیندهای صنعتی می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) که اخیراً معرفی شده است عملکرد خوبی در مسائل بهینه‌سازی نشان داده است. در این تحقیق الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بهبود یافته (ICOA) ارائه شده است. هدف از این مقاله مقایسه کنترلرهای مختلف با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بهبود یافته برای سیستم سه مخزن تنظیم شده است. بدین منظور عملکرد کنترلر FOPID بهینه شده با کنترلرهای دیگر، الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) و الگوریتم رقابت استعماری (ICA) مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، سیستم سه مخزن، کنترلر PID مرتبه کسری.

Fractional Order PID Controller Design for Level Control of Three Tank System Based on Improved Cuckoo Optimization Algorithm

Meysam Gheisarnezhad⁽¹⁾ - Hamed Mojallali⁽²⁾

(1) MSc. - In Charge of Control Room, Khazar Steel Complex, Rasht, Iran
m.ghesar2@gmail.com

(2) Assistant Professor - Electrical Engineering Department, University of Guilan, Guilan, Iran
mojallali@guilan.ac.ir

Fractional-order PID (FOPID) controller is a generalization of standard PID controller using fractional calculus. Compared with the Standard PID controller, two adjustable variables "differential order" and "integral order" are added to the PID controller. Three tank system is a nonlinear multivariable process that is a good prototype of chemical industrial processes. Cuckoo Optimization Algorithm (COA), that was recently introduced has shown its good performance in optimization problems. In this study, Improved Cuckoo Optimization Algorithm (ICOA) has been presented. The aim of the paper is to compare different controllers tuned with a Improved Cuckoo Optimization Algorithm (ICOA) for Three Tank System. In order to compare the performance of the optimized FOPID controller with other controllers, Genetic Algorithm(GA), Particle swarm optimization (PSO), Cuckoo Optimization Algorithm (COA) and Imperialist Competitive Algorithm (ICA).

Index Terms: Cuckoo optimization algorithm, three tank system, fractional order PID controller.

۱- مقدمه

(COA) در سال ۲۰۱۱ توسط رجیبون معرفی شد [۱۵] که نتایج بهتری در مقایسه با الگوریتم جستجوی فاخته نشان داد. در تحقیقی که در سال ۲۰۱۲ انجام شد الگوریتمی با نام الگوریتم بهینه سازی فاخته اصلاح شده ارائه شد [۱۶]. در این تحقیق از روشی جهت کاهش تدریجی شعاع تخمگذاری فاخته پیشنهاد شد. آنچه نشان داده شد کاهش مرحله‌ای شعاع تخمگذاری می‌تواند منجر به بهبود جستجو شود. در یک روش نوین در سال ۲۰۱۳ ترکیبی از الگوریتم جستجوی فاخته و الگوریتم ژنتیک با نام CUGA ارائه شد. در این تحقیق از الگوریتم جدید CUGA برای حل مسئله زمانبندی کار در تورهای محاسباتی طراحی و پیاده‌سازی شده است [۱۷].

در این مقاله سعی شده است روش‌های مختلفی برای بهبود الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ارائه شود. سپس الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بهبود یافته، جهت تنظیم نمودن پارامترهای کنترل‌کننده FOPID برای سیستم سه مخزن با دو ورودی _ دو خروجی به کار رفته است. بدین منظور از روش مجزا سازی سیستم MIMO سه مخزن به دو سیستم SISO با دو کنترل‌کننده که به صورت مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند استفاده می‌شود [۱۸]. شش اغتشاش سینوسی برای آزمایش مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی به سیستم سه مخزن اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها، برتری الگوریتم پیشنهاد شده در طراحی کنترل‌کننده FOPID در مقایسه با روش الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، فاخته و رقابت استعماری را به خوبی نشان می‌دهد.

۲- حسابان کسری

در این بخش به معرفی تعاریف اولیه علم حسابان کسری و همچنین روش تقریبی برای حل معادلات مرتبه کسری پرداخته شده است.

۱-۲- تعاریف حسابان کسری

حسابان کسری یکی از شاخه‌های علم ریاضیات به شمار می‌آید که تعمیم مشتق و انتگرال معمولی به مرتبه غیر صحیح دلخواه است [۱۹]. عملگر مشتق و انتگرال غیرصحیح به صورت (۱) بیان می‌شود.

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & : \alpha > 0, \\ 1 & : \alpha = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^\alpha & : \alpha < 0. \end{cases} \quad (1)$$

به طوری که a و t محدوده‌های عملگر D و $\alpha \in R$ می‌باشد. چندین تعریف برای بیان مشتق و انتگرال مرتبه کسری وجود دارد. تعاریف Riemann_Liouville (RL) و Grunwad_Letnikov (GL)، دو تعریف بسیار پرکاربرد می‌باشند. رابطه RL به صورت (۲) تعریف می‌شود.

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (2)$$

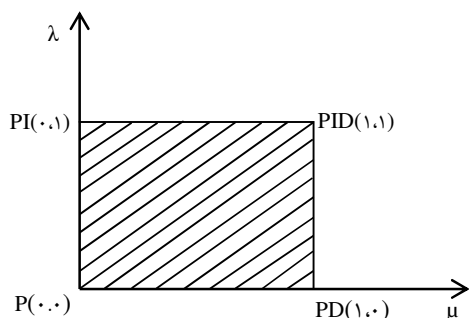
برای $(n-1 < \alpha < n)$ ، n یک عدد صحیح و Γ تابع گاما می‌باشد که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

رابطه GL به صورت (۴) تعریف می‌شود.

امروزه کنترل‌کننده‌های PID به طور گسترده در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلیل محبوبیت استفاده از آن‌ها، طراحی آسان و عملکرد مقاوم می‌باشد. طراحی و تنظیم کنترل‌کننده‌های PID در سال ۱۹۴۲ در یک زمینه تحقیقاتی بزرگ توسط زیگلر و نیکولز انجام شد [۱]. از آن زمان به بعد تحقیقات گسترده‌ای بر روی طراحی، پایداری، عملکرد و کاربردهای کنترل‌کننده‌های PID صورت گرفت [۳،۲]. یکی از روش‌های توسعه کنترل‌کننده‌های PID کلاسیک، استفاده از کنترل‌کننده‌های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می‌باشد. حسابان کسری (مشتق و انتگرالگیر با مرتبه کسری) یک مبحث ریاضی با بیش از ۳۰۰ سال سابقه تاریخی می‌باشد اما اخیراً در حوزه‌های علم و مهندسی به شدت مورد استقبال قرار گرفته است. حسابان کسری پتانسیل‌هایی برای درک بهتر پدیده‌هایی از جمله نوسانات کم، هرج و مرج، اشاعه و انتشار امواج، نفوذ و برگشت‌ناپذیری را نشان داد. کنترل‌کننده‌ها و سیستم‌های دینامیک مرتبه کسری بر اساس حسابان مرتبه کسری می‌باشند [۴-۶]. در سال ۱۹۹۹ پودلوبنی تعمیمی از کنترل‌کننده‌های PID به نام PID مرتبه کسری را بیان نمود و اثربخشی چنین کنترل‌کننده‌هایی را بر روی پاسخ محرک سیستم‌های مرتبه کسری نشان داد [۷]. توافقی و حائری در سال ۲۰۰۸ در تحقیقی مورد بررسی قرار دادند که کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری عملکرد بهتری در دفع اغتشاشات و همچنین حساسیت کمتری در مقابل تغییرات پارامترهای فرآیند در مقایسه با کنترل‌کننده‌های قدیمی دارند [۸]. سیستم سه مخزن (مدل DTS200)، یک سیستم غیرخطی با پارامترهای متغیر است که اولین بار توسط امیرا طراحی شد [۹]. در سال ۲۰۰۹ موزیکات در تحقیقی بر روی کنترل سیستم سه مخزن از روش تنظیم مکرر فیدبک (IFT) استفاده نمود [۹]. ملولی و همکارانش در تحقیقی به کنترل فازی تطبیقی مستقیم برای یک سیستم نامعین سه مخزن پرداختند [۱۰].

در این تحقیق برای تحلیل پایداری از شیوه لیاپانوف برای سیستم سه مخزن استفاده شد. ایده استفاده از حسابان کسری در سیستم‌های کنترل جدید نمی‌باشد بلکه پیش‌تر از این در قرن ۱۹ اتفاق افتاده است [۱۱]. اما ایده طراحی کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بسیار جدید می‌باشد. از جمله این تحقیقات چانگ و همکارانش از الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای طراحی کنترل‌کننده FOPID، به منظور بهینه‌سازی یک سیستم چند متغیره پیشنهاد دادند [۱۲]. مجید و همکارانش در تحقیقی از الگوریتم ازدحام ذرات برای طراحی کنترل‌کننده‌های FOPID استفاده نمودند [۱۳]. الگوریتم جستجوی فاخته (CS) یکی از جدیدترین الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد که در سال ۲۰۰۹ توسط شین او یانگ و دب ساوش، توسعه یافته است [۱۴]. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته



شکل (۱): ارتباط بین کنترل کننده FOPID و کنترل کننده PID استاندارد
Fig. (1): Relationship between FOPID controller and standard PID controller

۴- الگوریتم بهینه سازی فاخته

الگوریتم فاخته یک روش جدید جستجوی آگاهانه سراسری است که از زندگی پرندهای موسوم به فاخته الهام گرفته است. همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی COA هم با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند. جمعیتی که متشکل از فاخته‌ها است. این جمعیت از فاخته‌ها تعدادی تخم دارند که آن‌ها را در لانه تعدادی پرنده می‌زبان خواهند گذاشت. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم‌های پرنده می‌زبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرنده می‌زبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهد. هر چه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به زیست باشند و نجات یابند، به همان اندازه سود (تمایل) بیشتری به آن منطقه اختصاص می‌یابد. بنابراین موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که COA قصد بهینه‌سازی آن را دارد. فاخته‌ها برای بیشینه کردن نجات تخم‌های خود دنبال بهترین منطقه می‌گردند. هر فاخته به صورت تصادفی تخم‌هایی را در لانه پرندگان می‌زبان که در محدوده شعاع تخم‌گذاری یا ELR خود قرار دارد، می‌گذارد. در یک مسئله بهینه‌سازی هر متغیر دارای حد بالا و حد پایین var_{low} و var_{hi} است که هر ELR با استفاده از این حدود قابل تعریف خواهد بود. رابطه ELR برای هر فاخته به صورت رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{gn}{NI} \times (var_{hi} - var_{low}) \quad (12)$$

NI ماکزیمم تعداد تکرارها، gn تکرار فعلی و α متغیری است که حداکثر مقدار ELR با آن تنظیم می‌شود. وقتی تمام فاخته‌ها تخم‌های خود را گذاشتند برخی از تخم‌ها که کمتر شبیه تخم‌های پرنده می‌زبان هستند شناسایی شده و از لانه بیرون انداخته می‌شوند. نکته جالب دیگر در مورد فاخته‌ها این است که فقط یک تخم در هر لانه امکان رشد دارد.

وقتی جوجه فاخته‌ها رشد کردند و بالغ شدند مدتی در محیط و گروه‌های خودشان زندگی می‌کنند ولی وقتی زمان تخم‌گذاری نزدیک می‌شود به محلهای سکونت یا habitatهای بهتر که در آنجا شانس

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (4)$$

۲-۲- روش‌های تقریبی

از آنجایی که معادلات دیفرانسیلی مرتبه کسری به راحتی معادلات دیفرانسیلی معمولی قابل حل نمی‌باشند. اغلب از روش‌های تقریبی برای حل این معادلات استفاده می‌شود. از معروفترین روش‌های تقریبی، تقریب Crone [۲۰] می‌باشد. که به صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$s^q \approx k \prod_{n=1}^N \frac{1 + \frac{s}{\omega_{zn}}}{1 + \frac{s}{\omega_{pn}}}, \quad q > 0 \quad (5)$$

این تقریب در محدوده فرکانسی $[\omega_1, \omega_n]$ ، تعداد صفرها و قطب‌ها، بهره k طوری تنظیم می‌شود که رابطه (۵) از هر دو سمت، دارای بهره واحد در ۱ رادیان بر ثانیه باشد. فرکانس‌های صفرها و قطب‌ها از روابط (۶) تا (۱۰) به دست می‌آیند.

$$\alpha = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1}\right)^{\frac{q}{N}} \quad (6)$$

$$\eta = \left(\frac{\omega_n}{\omega_1}\right)^{\frac{1-q}{N}} \quad (7)$$

$$\omega_{z1} = \omega_1 \sqrt{\eta} \quad (8)$$

$$\omega_{zn} = \omega_{p,n-1} \eta, \quad n=2, \dots, N \quad (9)$$

$$\omega_{pn} = \omega_{z,n-1} \alpha, \quad n=1, \dots, N \quad (10)$$

برای طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده‌های FOPID می‌توان از جعبه ابزار Ninteger [۲۱] بهره گرفت. بعضی از پارامترهایی را که باید توسط بلوک Fractional PID تعیین نمود: پارامترهای بهره تناسبی، بهره انتگرالی، بهره مشتقی، مرتبه انتگرالی، مرتبه مشتقی، تعداد صفرها و قطب‌ها، تقریبی از پهنای باند دامنه فرکانس و فرمول تقریبی می‌باشند. در این تحقیق از روش Crone، با رنج فرکانسی $[0.01 \ 100]$ رادیان بر ثانیه و تعداد صفرها و قطب‌ها $N=5$ در نظر گرفته شد.

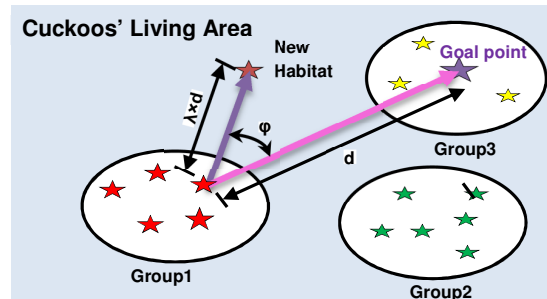
۳- کنترل کننده PID مرتبه کسری

معادله دیفرانسیلی کنترل‌کننده PID مرتبه کسری به صورت (۱۱) توصیف می‌شود.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^\mu e(t) \quad (11)$$

واضح است که برای کنترل کننده FOPID علاوه بر پارامترهای K_i, K_p و K_d ، دو پارامتر λ, μ نیز باید طراحی شوند. اگر پارامترهای λ, μ به صورت $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1)$ انتخاب شوند از کنترل‌کننده (۱۱) به ترتیب کنترل‌کننده P, PD, PI, PID حاصل می‌شود. ارتباط بین کنترل‌کننده FOPID و کنترل‌کننده PID استاندارد در شکل (۱) نمایش داده شده است. بنابراین همان طور که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده FOPID تعمیم یافته کنترل‌کننده PID می‌باشد. کنترل‌کننده PID مرتبه کسری دارای آزادی بیشتر و امکان تنظیم دقیق‌تری برای سیستم حلقه بسته فراهم می‌کند.

زنده ماندن تخم‌ها بیشتر است مهاجرت می‌کنند. پس از تشکیل گروه های فاخته در مناطق مختلف زیست کلی (فضای جستجوی مسئله) گروه دارای بهترین موقعیت به عنوان نقطه هدف برای سایر فاخته‌ها جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. وقتی فاخته‌های بالغ در اقصی نقاط محیط زیست زندگی می‌کنند تشخیص اینکه هر فاخته به کدام گروه تعلق دارد کار سختی است. برای حل این مشکل، گروه‌بندی فاخته‌ها توسط روش کلاس‌بندی K-means انجام می‌شود [۲۲]. حال که گروه‌های فاخته تشکیل شدند سود میانگین گروه محاسبه می‌شود تا بهینگی نسبی محل زیست آن گروه به دست آید. سپس گروهی که دارای بیشترین مقدار متوسط سود (بهینگی) می‌باشد به عنوان گروه هدف انتخاب شده و گروه‌های دیگر به سمت آن مهاجرت می‌کنند. هنگام مهاجرت به سمت نقطه هدف، فاخته‌ها تمام مسیر را به سمت محل هدف طی نمی‌کنند. آن‌ها فقط قسمتی از مسیر را طی کرده و در آن مسیر هم انحرافی دارند. این نحوه حرکت را در شکل (۲) به وضوح مشاهده می‌کنید.



شکل (۲): نحوه مهاجرت فاخته‌ها [۱۴]

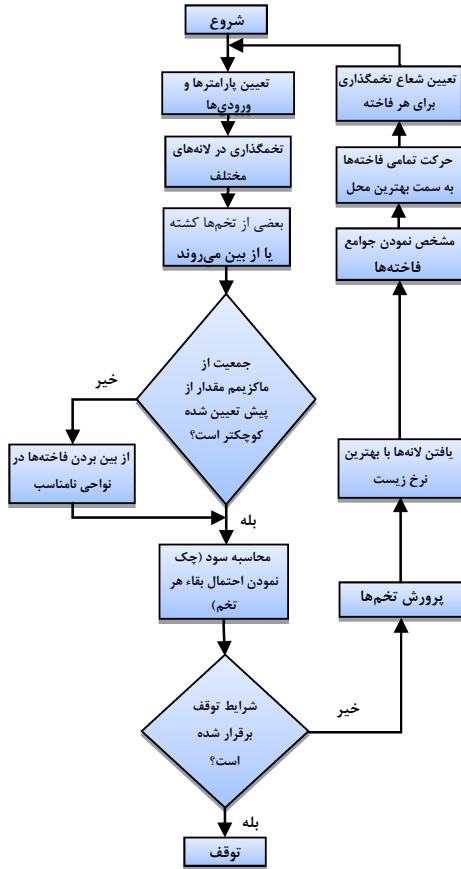
Fig. (2): Migration behavior of the cuckoos [14]

وقتی تمام فاخته‌ها به سمت نقطه هدف مهاجرت کردند و نقاط سکونت جدید هر کدام مشخص شد، هر فاخته صاحب تعدادی تخم می‌شود با توجه به تعداد تخم هر فاخته یک ELR برای آن مشخص می‌شود و سپس تخم‌گذاری شروع می‌گردد. با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد عددی مثل N_{max} حداکثر تعداد فاخته‌هایی را که می‌توانند در یک محیط زندگی کنند کنترل و محدود می‌کند. پس از چند تکرار تمام فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند. این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهند رفت. فرمول عملگر مهاجرت در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به صورت رابطه (۱۳) است.

$$X_i(k+1) = X_i(k) + F \times (X_{GlobalBest} - X_i(k)) \quad (13)$$

که در آن $X_i(k)$ موقعیت هر فاخته در تکرار k ام، $X_{GlobalBest}$ بهترین نقطه بهینه در هر گروه است.

فلوچارت الگوریتم فاخته در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم بهینه سازی فاخته

Fig. (3): Flowchart of Cuckoo optimization algorithm

۵- راه کارهای پیشنهادی برای بهبود الگوریتم فاخته (ICOA)

در این بخش از مقاله، چندین روش برای بهبود الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ارائه می‌شود.

۵-۱ بهبود ضریب شعاع تخم‌گذاری

کاهش مرحله‌ای شعاع تخم‌گذاری منجر به بهبود جستجو شده ودقت جواب‌ها را بالا می‌برد. در الگوریتم استاندارد COA این تغییر را می‌توان با کاهش تدریجی ضریب شعاع تخم‌گذاری انجام داد. کاهش ضریب شعاع تخم‌گذاری در طول اجرای COA توسط رابطه (۱۴) پیشنهاد می‌شود تا هنگام نزدیک شدن به جواب بهینه تخم‌ها در فضای کمتری قرار داده شوند و نقطه بهینه کلی به صورت دقیق‌تری حاصل شود.

$$\alpha = \alpha_1 - \frac{\text{Iteration}}{\text{Iter}_{max} \times \alpha_2} \quad (14)$$

که در آن α_1 مقدار ضریب شعاع تخم‌گذاری اولیه و α_2 یک مقدار ثابت بزرگتر از ۱ و Iter_{max} ماکزیمم تعداد تکرارها، Iteration تکرار فعلی می‌باشد. برای این تحقیق α_1 و α_2 برابر ۲ مقدار مناسبی می‌باشد.

۵-۲ تغییر در الگوی مهاجرت

در الگوی مهاجرت COA، فاخته‌ها تنها با در نظر گرفتن نقطه بهینه کلی اقدام به مهاجرت می‌کنند. استفاده از پارامتر حافظه در الگوی مهاجرت سبب بهبود الگوریتم فاخته می‌شود که اجرای آن به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- حافظه‌های $(X_{i1MBest}, X_{i2MBest}, \dots, X_{iDMBest})$ برای ذخیره بهترین موقعیت گذشته فاخته‌های هر گروه اختصاص داده می‌شود که در آن i شماره هر گروه و D تعداد گروه‌های انتخاب شده است. $X_{iMBest} = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in})$ بهترین موقعیت فاخته‌های ذخیره شده برای هر گروه به تعداد n فاخته فعلی می‌باشد.

۲- موقعیت فاخته‌های فعلی در هر گروه $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$ متناسب شماره گروه به حافظه‌های X_{iMBest} اضافه می‌شوند. سپس همه موقعیت فاخته‌های ذخیره شده مطابق مقدار سود آنها در X_{iMBest} مرتب می‌شوند.

۳- بهترین موقعیت‌های ذخیره شده در هر گروه از X_{iMBest} را به تعداد فاخته‌های فعلی هر گروه، در مهاجرت فاخته‌ها دخالت می‌دهیم. بنابراین الگوی مهاجرت توسط رابطه (۱۵) بهبود می‌یابد.

$$X_i(k+1) = X_i(k) + F_1 \times (X_{iMBest}(k) - X_i(k)) + F_2 \times (X_{GlobalBest} - X_i(k)) \quad (15)$$

F_1 و F_2 در رابطه (۱۵) پارامترهایی هستند که سبب انحراف می‌شوند. فاخته‌های جدید ایجاد شده از عملگر مهاجرت در هر گروه، متناسب شماره گروه به حافظه‌های X_{iMBest} اضافه می‌شوند و بهترین موقعیت فاخته‌ها بر اساس سود آنها برای X_{iMBest} انتخاب می‌شوند.

۵-۳ روش ترکیبی پیشنهادی GA، COA

بعد از عملگر مهاجرت در COA، فاخته‌های تولید شده آمادگی کامل برای پیاده‌سازی عملگرهای مختلف را دارا هستند. بدین سبب از عملگرهای انتخاب و ترکیب الگوریتم ژنتیک برای بهبود COA بهره گرفته شد. روند اجرای آن به صورت زیر است:

الف- انتخاب

۱- جمعیتی متشکل از فاخته‌ها بعد از مهاجرت فاخته، با توجه به میزان شایستگی آنها برای انجام ترکیب انتخاب می‌شوند. شایسته‌ترین فاخته‌ها براساس سود آنها باید با احتمال بیشتری انتخاب شوند. در اینجا برای این منظور از روش انتخاب مسابقه‌ای برای انتخاب m فاخته به عنوان والد استفاده خواهد شد در هر مرحله، ۴ فاخته را در نظر گرفته و از میان آنها، بهترین فاخته را از لحاظ شایستگی به عنوان والد انتخاب می‌گردند و این کار را m بار انجام می‌دهد تا m فاخته به عنوان والد انتخاب شود.

ب- نخبه گیری

برای افزایش سرعت الگوریتم تعدادی از بهترین فاخته‌ها به صورت مستقیم به نسل بعدی منتقل می‌شوند. این عمل به موازات عمل انتخاب بر روی سایر فاخته‌ها انجام می‌گیرد.

ج- ترکیب

با استفاده از فاخته‌های انتخاب شده به عنوان والد، نسل بعدی به وسیله فرآیند ترکیب تولید می‌شوند. تولید نسل از میان افراد به دست آمده از طریق عملگر ترکیب، توانایی تولید فاخته‌هایی که ممکن است در آغاز نبوده باشند را تضمین می‌کند. برای درک بهتر مراحل الگوریتم ICOA، فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته بهبود یافته در شکل (۴) نمایش داده شده است.

۶- سیستم سه مخزن

سیستم سه مخزن، یک سیستم غیر خطی و با پارامترهای متغیر می‌باشد که در سیستمهای کنترل و اتوماسیون برای اهداف آموزشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سیستم به عنوان یک نمونه اولیه در بسیاری از کاربردهای صنعتی نظیر فرآیندهای شیمیایی و سیستمهای نفت و گاز مشاهده شده است. شکل (۵) ساختار این سیستم را نشان می‌دهد. این سیستم شامل سه مخزن استوانه‌ای $T1$ ، $T2$ ، $T3$ یکسان می‌باشد که از طریق لوله به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند. مایع در زیر این مخازن جمع آوری می‌شود و مایع جمع‌آوری شده توسط دو پمپ قابل کنترل، مخازن $T1$ ، $T2$ را پر می‌کنند. مخزن $T3$ غیرقابل کنترل می‌باشد و مایع را تنها توسط مخازن $T1$ ، $T2$ دریافت می‌کند. جمعاً شش شیر نیز برای کنترل دستی مخازن وجود دارند که به صورت اغتشاش به سیستم وارد می‌شوند. اهداف کنترلی در سیستم سه مخزن نگه داشتن سطح مایع هر یک از مخازن $T1$ ، $T2$ در یک مقدار مطلوب می‌باشد.

۶-۱ مدل‌سازی سیستم

پارامترهای سیستم را تعریف می‌کنیم: h_n ارتفاع مایع در مخازن $n = 1, 2, 3$. Q_{nm} نرخ فلوی مایع از مخازن $n = 1, 2, 3$ به مخازن $m = 0, 1, 2, 3$ و Q_{200} نرخ فلوی مایع از مخزن $T2$ به مخزن جمع‌کننده مایع می‌باشد (شکل (۵) را ببینید)، Q_n نرخ فلوی تولید شده توسط پمپ‌های $n = 1, 2$ ، $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ می‌باشد. پمپ‌ها تنها سیگنالهای پیوسته بین $[0, 1]$ می‌توانند دریافت کنند. بدین معنی که با صفر پمپ توقف می‌کند و با ۱ پمپ در ماکزیمم فلوی کار می‌کند.

طبق بقای جرم در مخازن معادلات دیفرانسیلی سیستم به صورت روابط (۱۶) تا (۱۸) می‌باشند.

$$\dot{A}h_1 = Q_1 - Q_{13} - Q_{10} \quad (16)$$

$$\dot{A}h_2 = Q_2 - Q_{23} - Q_{20} - Q_{200} \quad (17)$$

$$\dot{A}h_3 = Q_{13} + Q_{23} - Q_{30} \quad (18)$$

مقادیر فلو با استفاده از قانون تعمیم یافته تویسلی به صورت رابطه (۱۹) پیدا می شوند.

$$Q_{nm} = a_{nm} s_v \operatorname{sgn}(h_n - h_m) \sqrt{2g|h_n - h_m|} \quad (19)$$

که در آن ضریب فلوی شیرهای ارتباط دهنده مخازن n و m می باشد. تعریف می کنیم:

$$h = [h_1 h_2 h_3]^T \quad (20)$$

$$Q = [Q_1 Q_2]^T \quad (21)$$

$$A(h) = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -Q_{13} - Q_{10} \\ -Q_{23} - Q_{20} - Q_{200} \\ Q_{13} + Q_{23} - Q_{30} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$B = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

معادلات (۱۶) تا (۱۸) را می توان به صورت روابط زیر نوشت:

$$\dot{h} = A(h) + BQ \quad (24)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} h \quad (25)$$

جایی که y بردار خروجی می باشد. مقدار ضریب a_{nm} برای هر کدام از شیرها بین [۰ ۱] می باشد که مقدار این ضرایب به صورت شش شش سینوسی با دامنه و فرکانس یک به سیستم اعمال می شوند. به طوری که برای مقدار صفر شیر کاملاً بسته می باشد و برای مقدار ۱ شیر کاملاً باز بوده و ماکزیمم فلو خواهیم داشت.

۶-۲- مجزاسازی

واضح است که سیستم سه مخزن MIMO (چند ورودی- چند خروجی) می باشد. از آنجایی که تعداد ورودی ها و تعداد خروجی های این سیستم برابر می باشند بنابراین امکان استفاده از روش مجزاسازی فراهم می باشد. یک فرآیند MIMO می تواند توسط یک مجموعه از چندین فرآیند SISO (تک ورودی- تک خروجی) کنترل شود به صورتی که مستقل از یکدیگر عمل کنند.

فرآیند غیر خطی زیر را بررسی می کنیم:

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t) u(t) \quad (26)$$

$$y = C(x, t) + D(x, t) u(t) \quad (27)$$

که در آن t زمان، x بردار حالت، y بردار خروجی و A، B، C و D ماتریسهای مدل فضای حالت هستند. اکنون به منظور مجزاسازی کامل بردار w را به صورت رابطه (۲۸) معرفی می کنیم.

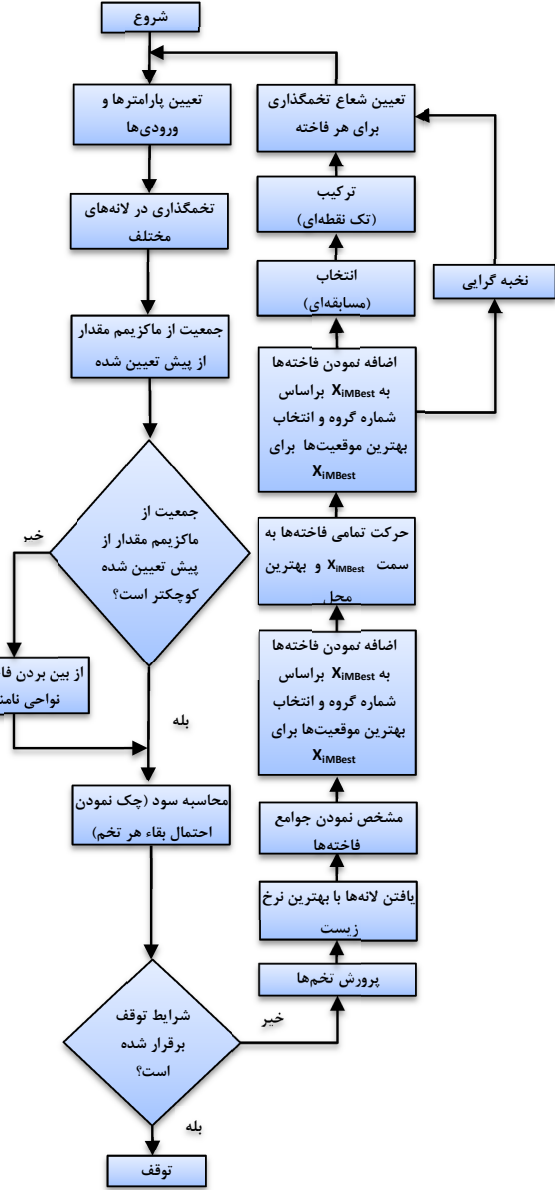
$$u(x, t) = F(x, t) + G(x, t) w \quad (28)$$

برای تعیین ماتریسهای F و G ضروری است تا مرتبه d_i را بدانیم به طوری که بردار ورودی u_i مستقیماً بر $\frac{d^i y_i}{dt^i}$ تأثیر بگذارد. اگر d_i سطر از ماتریس D حداقل یک عنصر غیر صفر داشته باشد $d_i = 0$ خواهد بود. از آنجایی که $u_i (i = 1, 2)$ بر اولین مشتق از y_i اثر می گذارد بنابراین $d_1 = d_2 = 0$ خواهد بود. در جایی که:

$$y_i^* = \frac{d^i y_i}{dt^i} \quad (29)$$

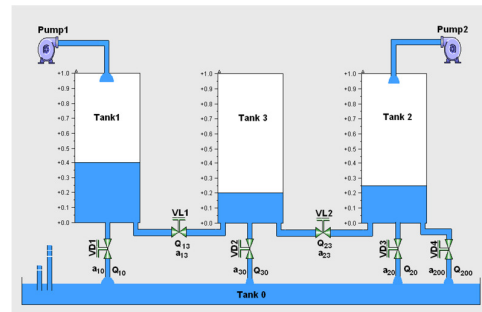
$$y^* = C^*(x, t) + D^*(x, t) u(t) \quad (30)$$

(۶۰)



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم بهینه سازی فاخته بهبود یافته

Fig. (4): Flowchart of improved Cuckoo optimization algorithm



شکل (۵): ساختار سیستم سه مخزن [۱۷]

Fig. (5): Structure of three tank system [17]

در این سیستم

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 & \dot{h}_2 \end{bmatrix}^T = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -Q_{13} - Q_{10} & -Q_{23} - Q_{20} \\ Q_{200} \end{bmatrix}^T + \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q \quad (31)$$

با تشکیل

$$u = F + G w = -D^{*-1} C^* - D^{*-1} M + D^{*-1} L w \quad (32)$$

با جایگذاری این رابطه در (۳۰) خواهیم داشت:

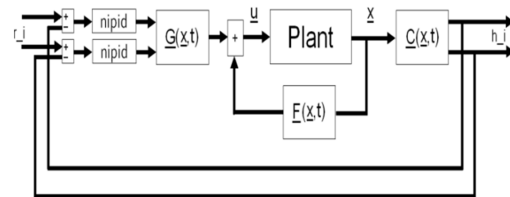
$$y^* = -M + L w \quad (33)$$

اگر L یک ماتریس قطری باشد بدین معنی است که خروجی مجزا شده است. برای این سیستم یک انتخاب خوب برای M و L به صورت (۳۴) و (۳۵) است.

$$M = [a_1 h_1 \quad a_2 h_2]^T \quad (34)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix}^T \quad (35)$$

ضرایب a_1, a_2, l_1, l_2 باید طوری انتخاب شوند که پاسخ سیستم به اندازه کافی سریع برای اهداف ما باشد. این ضرایب را به صورت $a_2 = 0.0614, a_1 = 0.0588, l_2 = 0, l_1 = 0.01573$ از مرجع [۱۷] انتخاب می‌کنیم. شکل (۶) کنترل حلقه بسته سیستم مجزا شده را نمایش می‌دهد.



شکل (۶): کنترل مجزا سازی توسط کنترل کننده‌های SISO

Fig. (6): Decoupling control by SISO controllers

چالش اساسی در این سیستم اشباع بودن عملگر کنترلی می‌باشد زیرا پمپ‌ها نمی‌توانند بیشتر از ماکزیمم فلو تولید کنند. همچنین نمی‌توانند برای مقادیر منفی از عملگر کنترلی فلو تولید نمایند. این بدین معنا است در صورتی که مایع از یک مخزن به مخزن دیگر جریان یابد غیر ممکن است برای خالی نمودن مخزن فلو منفی ایجاد نمود.

۷- طراحی کنترل کننده FOPID

در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی تابع هزینه از شاخص کارایی RMSE استفاده شد. رابطه RMSE به صورت رابطه (۳۶) تعریف شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^2(k)} \quad (36)$$

که در آن $e(k) = r_i(k) - h_i(k)$ اختلاف بین سیگنال ورودی و سیگنال خروجی در سیستم حلقه بسته می‌باشد. از آنجایی که هر یک از کنترل کننده‌های FOPID دارای ۵ پارامتر می‌باشند جمعاً ۱۰ پارامتر باید تنظیم شوند. بنابراین الگوریتم بهینه‌سازی، پارامترهای کنترل کننده را در یک فضای ۱۰ بعدی جستجو می‌نماید. بردار

پارامترهای کنترل کننده FOPID برای اُمین عضو جمعیت به صورت

(۳۷) در نظر گرفته شده است.

$$\vec{X}_i = [K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}, \lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2] \quad (37)$$

که در آن پارامترهای $K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}, \lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2$ به ترتیب مربوط به عناصر کنترل کننده اول و کنترل کننده دوم می‌باشند.

۸- نتایج شبیه سازی

در این مقاله سیستم سه مخزن با استفاده از روش مجزاسازی به دو سیستم SISO تبدیل شده است. مقادیر پارامترهای سیستم سه مخزن در جدول (۱) آورده شده است.

Table (1): The values of parameters of Three Tank System

جدول (۱): مقادیر پارامترهای سیستم سه مخزن

مقادیر	پارامترها
$A=0.0154 \text{ m}^2$	مساحت بخش عبوری مخازن
$S_v=5 \times 10^{-4} \text{ m}$	مساحت بخش عبوری شیرها
$h_{\max}=62 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$	ماکزیمم ارتفاع مایع مخزن
$Q_{\max}=7 \text{ L/min}$	ماکزیمم فلو پمپ‌ها

کنترل کننده PID مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های GA, PSO, COA, ICA و الگوریتم پیشنهادی ICOA برای سیستم سه مخزن طراحی نمودیم. بدین منظور از معیار کارایی RMSE جهت تنظیم ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری بهره گرفته شده است. برای آزمایش مقاوم بودن کنترل کننده‌های طراحی شده، شش اغتشاش سینوسی با دامنه و فرکانس یک به شیرهای متصل به مخازن اعمال شد. همان طور که می‌دانیم نرخ همگرایی الگوریتم‌های تکاملی به شدت به جمعیت اولیه آن وابسته می‌باشد. انتخاب جمعیت بالا برای الگوریتم‌های تکاملی زمان اجرای برنامه را کند می‌نماید. برای آنکه توانایی الگوریتم پیشنهادی بیشتر آشکار شود جمعیت بسیار کمتری برای آن نسبت به الگوریتم‌های مورد مقایسه انتخاب کردیم. در این مقاله تعداد جمعیت اولیه برای الگوریتم‌های GA, PSO, ICA برابر ۸۰ در نظر گرفته شد. تعداد فاخته‌های اولیه COA و ICOA برابر ۵ در نظر گرفته شد و ماکزیمم تعداد فاخته‌ها برای COA برابر ۸۰ و برای ICOA برابر ۳۰ انتخاب شدند. برای GA، درصد نرخ ترکیب و جهش به ترتیب برابر ۷۰٪ و ۲۰٪، برای PSO، ضرایب پارامتر اجتماعی و ادراکی برابر ۲ و ضریب وزن اینرسی در بازه [۰.۹۹ ۱] و برای ICA تعداد امپراطوری‌های اولیه برابر ۱۲ و نرخ انقلاب برابر ۰.۳ در نظر گرفته شد. تعداد کلاسهای خوشه‌بندی برای الگوریتم‌های COA و ICOA برابر یک و نرخ ترکیب برای ICOA برابر ۷۰٪ انتخاب شد. محدوده پارامترهای کنترل کننده‌های FOPID برای الگوریتم‌های مختلف بصورت جدول (۲) انتخاب شده‌اند.

Table (5): Cost function obtained by different algorithms
جدول (۵): تابع هزینه به دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف

	RMSE1	RMSE2	RMSE
GA	0.31838×10^{-3}	0.60933×10^{-3}	0.92777×10^{-3}
PSO	0.37625×10^{-3}	0.49285×10^{-3}	0.8691×10^{-3}
COA	0.48908×10^{-3}	0.81988×10^{-3}	1.30896×10^{-3}
ICA	0.19352×10^{-3}	0.48034×10^{-3}	0.67387×10^{-3}
ICOA	0.18261×10^{-3}	0.37703×10^{-3}	0.55965×10^{-3}

از جدول (۵) قابل مشاهده است کنترل کننده FOPID به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی ICOA، به هزینه RMSE1 و RMSE2 و کمتری نسبت به GA، PSO، COA و ICA رسیده است. بنابراین پارامترهای FOPID متناظر کنترل کننده اول و کنترل کننده دوم، به دست آمده از ICOA بهتر از الگوریتم های مورد مقایسه می باشد. همچنین با در نظر گرفتن هزینه کل RMSE، کنترل کننده FOPID حاصل از ICOA، به طور کلی، بهترین کنترل کننده می باشد. شکل های (۷) و (۸) ارتفاع مخازن T1، T2 سیستم سه مخزن با در نظر گرفتن ورودی ۰.۶ با استفاده از کنترل کننده FOPID توسط الگوریتم های GA، PSO، COA، ICA و ICOA را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود کنترل کننده های FOPID طراحی شده توسط الگوریتم های مختلف پاسخ تقریباً یکسانی دارند و همه آنها در برابر اغتشاشات مقاوم می باشند.

Table (2): The range of parameters of FOPID controller
جدول (۲): محدوده پارامترهای کنترل کننده FOPID

مقادیر	پارامترها
(۰ ۱۰۰۰]	محدوده K_p
(۰ ۱۰۰۰]	محدوده K_i
(۰ ۱۰۰۰]	محدوده K_d
(۰ ۱)	محدوده λ
(۰ ۱)	محدوده μ

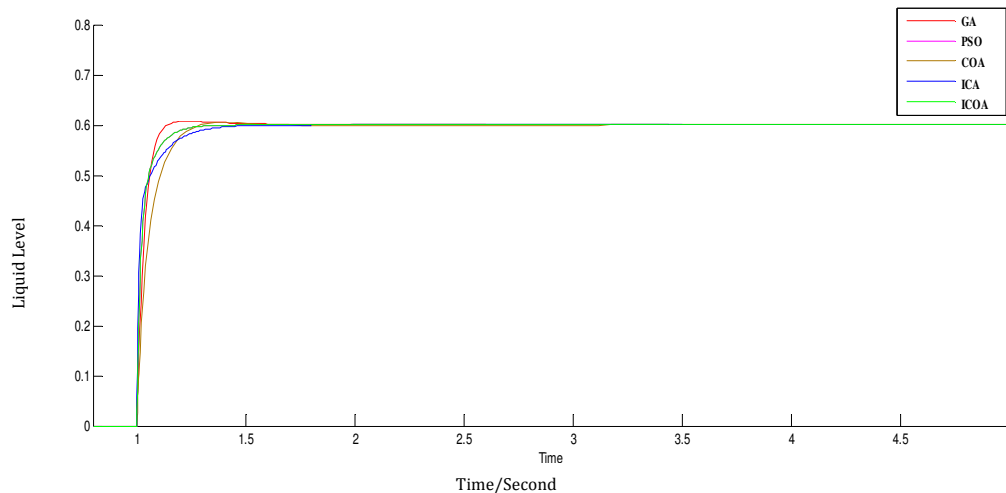
پارامترهای کنترل کننده های FOPID و هزینه RMSE به دست آمده از هر یک از روش های GA، PSO، COA، ICA و ICOA در جدول (۳) تا (۵) نمایش داده شده اند.

Table (3): The parameters of first FOPID controller
جدول (۳): پارامترهای FOPID کنترل کننده اول

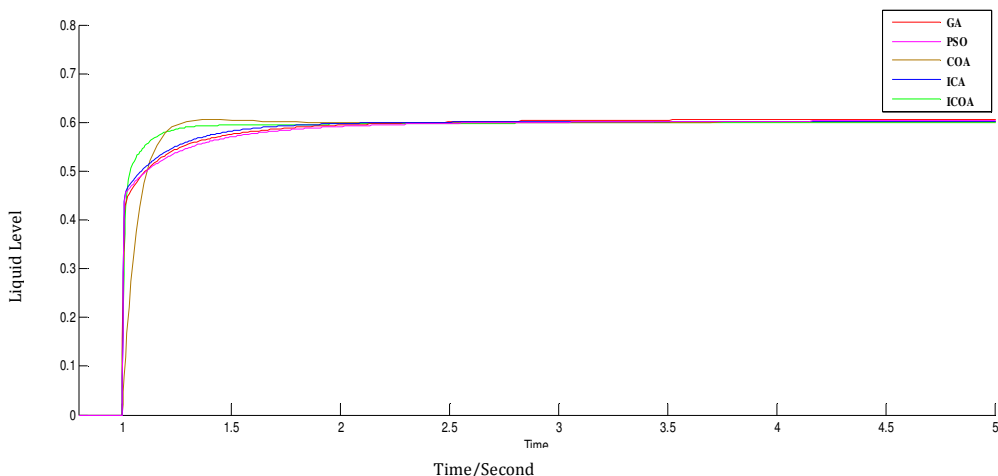
	K_{p1}	K_{i1}	K_{d1}	λ_1	μ_1
GA	۶۶۶۶۵۴۶	۸۸۶.۳۰۵۷	۷۹۱.۸۱۸۴	۰.۳۲۵۶۱	۰.۰۵۰۳۴
PSO	۷۶۷.۱۲۲۸	۶۳۷.۱۳۰۲	۷۵۸.۷۵۴۸	۰.۵۶۲۶۲	۰.۲۴۷۸۱
COA	۷۵۶۳۹۶	۹۵۰.۵۰۱۸	۱۹۰.۴۹۰۸	۰.۱۴۶۷۱	۰.۳۶۵۷۸
ICA	۴۳۵.۴۵۴	۱۰۰۰	۵۳۵.۸۹۷۵	۰.۳۶۹۶۲	۰.۵۰۷۳۲
ICOA	۷۶۷.۱۲۲۸	۶۳۷.۱۳۰۲	۷۵۸.۷۵۴۸	۰.۵۶۲۶۲	۰.۲۴۷۸۱

Table (4): The parameters of second FOPID controller
جدول (۴): پارامترهای FOPID کنترل کننده دوم

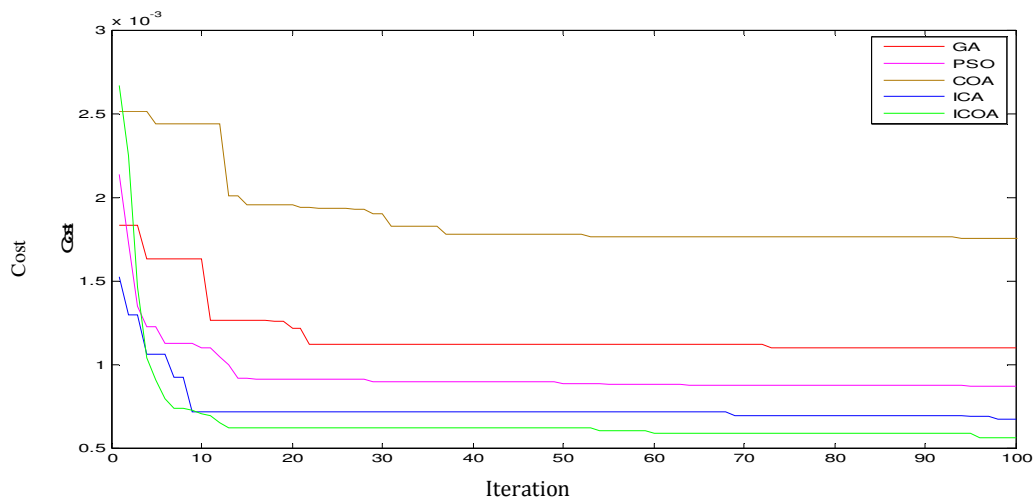
	K_{p2}	K_{i2}	K_{d2}	λ_2	μ_2
GA	۷۰۳۶۱۰۵	۲۸۰.۹۰۴۵	۳۳۲.۷۸۹	۰.۷۸۷	۰.۷۷۶۸۹
PSO	۶۸۶.۴۹۷۹	۶۶۹.۵۲۷۶	۵۵۷.۴۸۵۶	۰.۳۵۶۵۹	۰.۸۲۶۹۹
COA	۸۷۰.۴۶۷۴	۲۸۱.۳۲۹۵	۲۵۰.۵۸	۰.۴۰۶۵۹	۰.۶۱۵۴۵
ICA	۸۴۸.۵۷۱۷	۹۸۷.۵۲۲	۵۸۱.۰۴۹۶	۰.۲۶۶۲۳	۰.۸۱۴۴۶
ICOA	۱۷۳.۳۱۳۶	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰.۲۴۱۳۶	۰.۳۹۳۷۹



شکل (۷): ارتفاع مخزن T1 با استفاده از کنترل کننده FOPID
Fig. (7): Height of tank T1 using FOPID controller

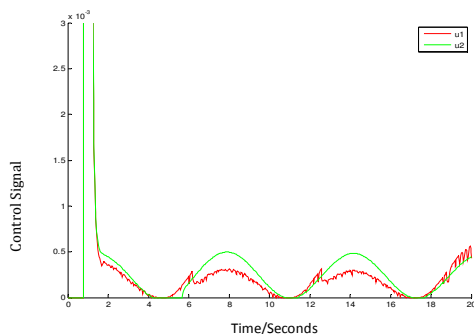


شکل (۸): ارتفاع مخزن T2 با استفاده از کنترل کننده FOPID
 Fig. (8): Height of tank T2 using FOPID controller



شکل (۹): حداقل هزینه GA, PSO, COA, ICA و ICOA به ازای تعداد تکرار
 Fig. (9): Minimum cost of GA, PSO, COA, ICA and ICOA versus iteration

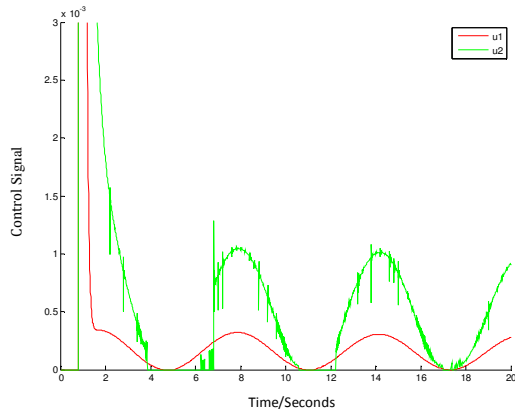
سیستم سه مخزن که با استفاده از الگوریتم‌های مختلف طراحی شده‌اند آورده شده است. برای آنکه نتایج بهتر نشان داده شود سیگنال‌های کنترلی در مقیاس $10^{-3} \times 3$ نمایش داده شده است.



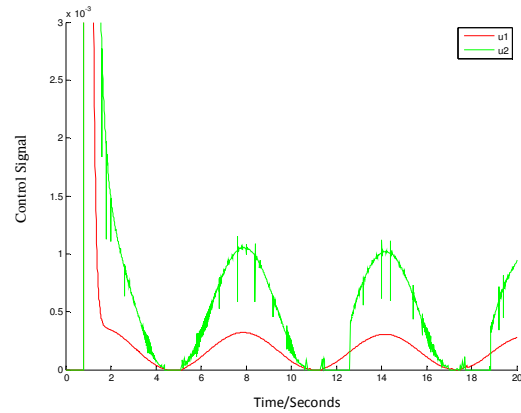
شکل (۱۰): سیگنال‌های کنترلی الگوریتم GA
 Fig. (10): Control signals of GA algorithm

شکل (۹) هزینه مینیمم GA, PSO, COA, ICA و ICOA را بر حسب تکرار نسل نشان می‌دهد نرخ همگرایی از آنجایی دارای اهمیت می‌باشد که طراحی بسیاری از سیستم‌ها زمانبر می‌باشد. بنابراین رسیدن به جواب بهینه در حداقل تکرار بسیار پراهمیت می‌باشد. با توجه به شکل الگوریتم ICOA نرخ همگرایی بهتری نسبت به الگوریتم‌های GA, PSO, COA و ICA دارد و در نهایت به مقدار تابع هزینه RMSE کمتری رسیده است. این نتایج زمانی پراهمیت است که انتخاب جمعیت کمتر برای الگوریتم پیشنهادی سبب کاهش زمان اجرای الگوریتم تا حد زیادی خواهد شد.

همان طور که در بخش ۶ سیستم سه مخزن معرفی شد چالش اصلی که در طراحی سیستم سه مخزن با آن روبرو هستیم این است که برای مدل‌سازی واقعی سیستم پمپ‌ها تنها سیگنال‌های پیوسته بین [۰ ۱] می‌توانند دریافت نمایند. بنابراین سیگنال‌های کنترل‌کننده بین [۰ ۱] اشباع شده‌اند. در شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) سیگنال کنترلی U برای



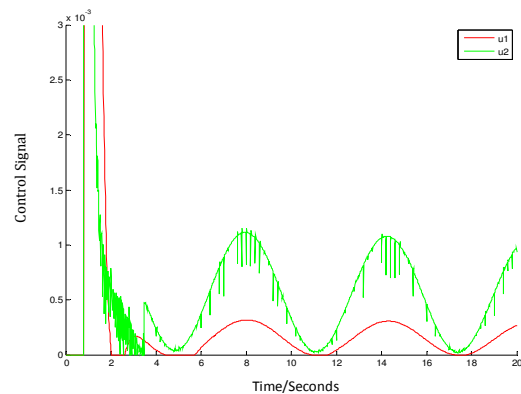
شکل (۱۴): سیگنال‌های کنترلی الگوریتم ICOA
Fig. (14): Control signals of ICOA algorithm



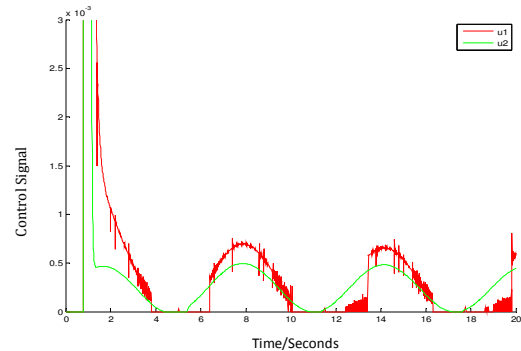
شکل (۱۱): سیگنال‌های کنترلی الگوریتم PSO
Fig. (11): Control signals of PSO algorithm

۹- نتیجه گیری

در این مقاله مدل سیستم غیرخطی سه مخزن MIMO چند متغیره معرفی شد. سیستم سه مخزن با استفاده از روش مجزا سازی به دو سیستم SISO تبدیل شده است. کنترل کننده PID مرتبه کسری برای سیستم سه مخزن با استفاده از روش‌های الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی فاخته، رقابت استعماری و همچنین الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی فاخته بهبود یافته طراحی شد. بدین منظور از معیار کارایی RMSE جهت تنظیم ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری بهره گرفته شده است. برای آزمایش مقاوم بودن کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری طراحی شده، شش اغتشاش به صورت سینوسی به سیستم سه مخزن اعمال شد. نتایج نشان داد که کنترل کننده PID مرتبه کسری طراحی شده برای سیستم سه مخزن با استفاده از الگوریتم‌های مختلف در برابر اغتشاشات مقاوم بوده و دارای عملکرد خوبی می‌باشند. همچنین در این مقاله، نرخ همگرایی ICOA با الگوریتم‌های GA، PSO، COA و ICA مورد مقایسه قرار گرفت. برای نشان دادن قابلیت الگوریتم پیشنهادی، جمعیت بسیار کمتری برای ICOA نسبت به الگوریتم‌های مورد مقایسه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد ICOA دارای نرخ همگرایی بالاتری نسبت به GA، PSO، COA و ICA دارد و در نهایت مقدار تابع هزینه آن به مقدار کمتری همگرا شده است.



شکل (۱۲): سیگنال‌های کنترلی الگوریتم COA
Fig. (12): Control signals of COA algorithm



شکل (۱۳): سیگنال‌های کنترلی الگوریتم ICA
Fig. (13): Control signals of ICA algorithm

References

- [1] J.G. Ziegler, N.B. Nicholas, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. of the ASME, No. 64, pp.759_768, Nov. 1942.
- [2] A.A. Zamani, S.M. Kargar-Dehnavi, "Compensation of actuator's saturation by using fuzzy logic and imperialist competitive algorithm in a system with PID Controller", Vol. 3, No. 11, pp. 21-26, summer 2013. (in Persian)
- [3] K.J. Aström, T. Hägglund, "The future of PID control", Control Engineering Practice, Vol. 9, No. 11, pp. 1163-1175, Nov. 2001.
- [4] K.B. Oldham, J. Spanier, "The fractional calculus: Theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order", Academic Press, 1974.
- [5] M. Safaei, S. Hosseinia, M.H osseini-Toodeshki "A general method for designing fractional order PID controller", Vol. 3, No. 12, pp. 25-34, Winter 2013 (in Persian).
- [6] K.S. Miller, B. Ross, "An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations", Wiley, New York, 1993.
- [7] I. Podlubny, "Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 44, No. 1, pp. 208-213, Jan. 1999.
- [8] M.S. Tavazoei, M. Haeri, "Choas control via a simple fractional order controller", Physics Letter A, Vol. 372, pp. 798-807, Feb. 2008.
- [9] Amira, "DTS200 – laboratory setup three tank system", Documentation, Amira GmbH, Duisburg, Germany, 2000.
- [10] I. Mosicat, "Iterative feedback tuning techniques: applications to control or three-tank system", B.Sc, Thesis, Politehnica Univ. of Timisoara, Romania, 2009.
- [11] E.M. Mellouli, S. Sefriti, I. Boumhidi, "Direct adaptive fuzzy control for an uncertain three-tank-system", International Journal of Research and Reviews in Artificial intelligence, Vol. 1, No. 4, 2011.
- [12] M. Axtel, E.M. Bise, "Fractional calculus applications in control systems", Proceedings of the IEEE/NAECON, Vol. 2, pp. 563–566, Dayton, OH, May 1990.
- [13] L.Y. Chang, H.C. Chen, "Tuning of fractional PID controllers using adaptive genetic algorithm for active Magnetic bearing system", WSEAS Trans. on Systems, Vol. 8, pp. 226–236, 2009.
- [14] Z. Majid, K.G. Masoud, S. Nasser, P. Mostafa, "Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization", Control Engineering Practice, Vol. 17, No. 12, pp. 1380-1387, Dec. 2009.
- [15] X.S. Yang, S. Deb, "Cuckoo search via Lévy Flights", Proceeding of the IEEE/NABIC, pp. 210–214, Coimbatore, Dec. 2009.
- [16] R. Rajabioun, "Cuckoo Optimization Algorithm", Applied Soft Computing Journal, Vol. 11, No. 8, pp. 5508_5518, Dec. 2011.
- [17] H. Kahramanli, "A modified cuckoo optimization algorithm for engineering optimization", International Journal of Future Computer and Communication, Vol. 1, No. 2, pp. 199-201, 2012.
- [18] M. Rabiee, H. Sajedi, "Job scheduling in grid computing with combination of cuckoo and genetic algorithms", Payame Noor University National Conference on Information Technology and Networking, 2013.
- [19] G. Vinagre, D. Valério, J. Sá da Costa, "Ruled PID and fractional PID for a three-tank liquid system", In Fractional Signals and Systems, Caparica, 2009.
- [20] C.Y. Quan, "Applied fractional calculus in controls and signal processing", Proceeding of the IEEE/ACC, Atlanta, USA, Dec. 2010.
- [21] A. Oustaloup, "La commande CRONE: CommandeRobuste d'Ordre non entier", Hermès, Paris, 1991.
- [22] D. Valério, J. Sá da Costa, "NINTEGER: A non-integer control toolbox for MATLAB", Proceedings of the Fractional Differentiation and its Applications, Bordeaux, 2004.
- [23] G. Hu, S. Zho, J. Guan, X. Hu, "Towards effective document clustering: A constrained K-means based approach", Information Processing and Management, Vol. 44, No. 4, pp. 1397–1409, 2008.

