



## طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه برای کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با رویکرد چند هدفه با الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب

مجید مرادی زیرکوهی\*

استادیار، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، دانشکده فنی و مهندسی

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

### چکیده

چون موتورهای دارای ساختاری ساده و طول عمر زیاد هستند کنترل دقیق سرعت آنها برای افزایش عملکرد و کاربردهای صنعتی بسیار مهم است. در این مقاله به کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با کنترل کننده PID مرتبه کسری پرداخته می‌شود. یک از نوآوری‌های این مقاله در نظر گرفتن دینامیک چاپر است. در نظر گرفتن دینامیک چاپر از یک سو باعث پیچیده شدن دینامیک سیستم و از سویی دیگر از نقطه نظر عملی باعث کاهش ریبیل جریان آرمیچر می‌شود. این مهم باعث بهبود پاسخ گذرا و در نتیجه تنظیم بهتر سرعت می‌شود. علاوه بر این به عنوان یک نوآوری سعی می‌شود تا با استفاده از روش جدید بهینه‌سازی چرخه آب با رویکردی چند هدفه ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری بگونه‌ای تنظیم شود که عملکرد کنترلی خوبی حاصل شود. مقایسه نتایج با الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل و پرندگان نشان می‌دهد که کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب از نقطه نظر زمان صعود، فراجش و خطای حالت ماندگار عملکرد بهتری دارد.

**کلمات کلیدی:** حسابان کسری؛ کنترل کننده PID مرتبه کسری؛ موتور DC؛ الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب.

## Design of Optimal FOPID Controller for Speed Control of DC Motor Including Drive and Chopper Dynamic Considering Multi-Objective Optimization Using Water Cycle Optimization Algorithm

M. Moradi Zirkohi\*

Asst. Prof., Electrical. Eng., Behbahan Khatam Alanbia Univ. of Technology, Behbahan, Iran.

### Abstract

Since DC motors have simple structure and long life, the precise speed control for increasing performance and industrial applications is of great importance. This paper is devoted to designing a fractional PID controller in order to speed control of a DC motor by considering the drive and chopper dynamics. As a novelty, chopper dynamic is also considered. From a control point of view, the dynamics of the chopper could complicate the system dynamics, and from a practical point of view, it could reduce the ripple of the armature current. This improves the transient response and results in better speed regulation. In addition, as a novelty, to adjust the fractional order PID controller coefficients a new optimization approach called water-cycle optimization (WCA) algorithm by considering a multi-objective criteria is employed. The results obtained are compared with the artificial bee colony and particle swarm optimization algorithm. The results show that the fractional order PID controller optimized by the WCA algorithm performs better in terms of rise-time, overshoot and steady state error.

**Keywords:** Fractional Calculus; Fractional PID Controller; DC Motor; Water Cycle Optimization Algorithm.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۰۱۵۸۸۶۵۶۷؛ فاکس: ۰۶۱۵۲۷۳۲۸۰۸

آدرس پست الکترونیک: [moradi@bkatu.ac.ir](mailto:moradi@bkatu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

بخاطر افزایش پیچیدگی کاربردهای عملی، صنعت نیاز به درایوهای با عملکرد قابل اعتماد و رضایت بخش دارد. از مواردی که نیاز به درایو با عملکرد بالا دارد می‌توان به حوزه رباتیک، موتورهای کشتی و ... نام برد. این کاربردها در واقع نیاز به سیستم درایوی دارند که دارای پاسخ دینامیکی سریع و از نقطه نظر کنترلی نسبت به تغییرات بار غیر حساس باشد. برای برآوردن چنین نیازهایی سیستم درایو باید سرعت مطلوب را بخوبی ردگیری کند [۱]. بخاطر کنترل خوبی که بر روی موتور DC وجود دارد برای این منظور درایو موتور DC انتخاب خوبی است. اگر چه درایوهای موتور AC روند رو به روشنی در کاربردهای صنعتی پیدا کرده است ولی در کاربردهایی که نیاز به سرعت متغیر، کنترل آسان و هزینه کم باشد درایو موتور DC ترجیح داده می‌شود. یکی از مزیت‌های موتورهای DC این است که ولتاژ آرمیچر و میدان دکوپله هستند. در واقع می‌توان مثلاً با ثابت نگه داشتن جریان میدان، جریان آرمیچر را با تغییر ولتاژ اعمالی به آن مستقلاً کنترل کرد. یکی از مزیت‌های دیگر موتورهای DC دارا بودن شتاب راه اندازی خوب می‌باشد. از نقطه نظر کنترلی دینامیک موتور DC یک سیستم تک ورودی- تک خروجی است که دارای مشخصه سرعت خوبی است. این ویژگی موتور DC باعث کنترل پذیری خوب در محدوده وسیعی از سرعت می‌شود. همین ویژگی برجسته موتور DC را اولین انتخاب برای بیشتر کاربردهای عملی کرده است. برای کنترل سرعت درایو موتور DC یک سیستم حلقه بسته که مشتمل بر دو حلقه است استفاده می‌شود. در حلقه داخلی جریان و در حلقه خارجی سرعت کنترل می‌شود [۲]. در میان کنترل کننده‌های گوناگونی که بدین منظور تا کنون پیشنهاد شده است کنترل کننده PID بخاطر سادگی ساختار و پیاده‌سازی راحت بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

یکی از روش‌های توسعه کنترل کننده‌های PID کلاسیک، استفاده از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می‌باشند [۳، ۴]. حسابان کسری (مشتق و انتگرالگیر با مرتبه کسری) از مدت زمان بسیار طولانی مورد توجه ریاضیدان‌ها قرار داشته است ولی کاربرد آن در مسائل مهندسی به ویژه در مسائل مدل‌سازی و کنترل سابقه طولانی

ندارد. در کنترل کننده PID کلاسیک سه درجه آزادی داریم در صورتی که در کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری پنج درجه آزادی وجود دارد. به خاطر آزادی عملی که بر روی مرتبه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر وجود دارد، می‌توان سیستم‌های فیزیکی را با دقت بسیار بالایی مدل نمود. در زمینه کنترل سیستم‌ها نیز وضعیت به همین منوال می‌باشد، یعنی می‌توان کنترل کننده‌هایی با کارایی بسیار بالا، چه برای سیستم‌های با مرتبه کسری و چه برای سیستم‌های با مرتبه صحیح طراحی نمود [۵]. در سال ۱۹۹۹ پودلونی تعمیمی از کنترل کننده‌های PID به نام PID مرتبه کسری را بیان کرد و اثر بخشی چنین کنترل کننده‌هایی را بر روی پاسخ محرک سیستم‌های مرتبه کسری نشان داد [۶]. در [۷] نشان داده شد که کنترل کننده‌های مرتبه کسری عملکرد بهتری در دفع اغتشاش و همچنین حساسیت کمتری در مقابل تغییرات پارامترهای فرایند در مقایسه با کنترل کننده‌های قدیمی دارند.

ایده استفاده از حسابان کسری در سیستم‌های کنترل جدید نمی‌باشد بلکه پیش‌تر از این در قرن ۱۹ اتفاق افتاده است [۸]. اما ایده طراحی کنترل کننده مرتبه کسری با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بسیار جدید می‌باشد. از جمله این تحقیقات استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری برای یک سیستم چند متغیره است [۹]. از الگوریتم ازدحام ذرات نیز برای بهینه‌سازی کنترل کننده PID مرتبه کسری استفاده شده است [۱۰].

از طرفی موتورهای DC دارای کاربردهای متنوعی از جمله در بازوهای رباتیک هستند. این موتورها دارای ساختاری ساده و طول عمر زیاد هستند. از این رو کنترل دقیق سرعت آنها برای افزایش عملکرد و کاربردهای صنعتی بسیار مهم است. تا کنون روش‌های زیادی از جمله کنترل غیر خطی [۱۱] و کنترل بهینه [۱۲] برای کنترل موتور DC پیشنهاد شده است. این روش‌ها دارای ساختار پیچیده هستند و اعمال آنها معمولاً پر هزینه است. در این مقاله با گذر از کارهای انجام شده به کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با کنترل کننده PID مرتبه کسری پرداخته می‌شود. قابل توجه آنکه ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور DC را می‌توان با استفاده از چاپر کنترل کرد.

موتور DC ارائه روش جدید و بهینه کنترلی با در نظر گرفتن ملاحظات عملی، مورد نیاز صنعت است.

در ادامه در بخش دوم کنترل کننده PID مرتبه کسری بیان می‌شود. سپس در بخش سوم به معرفی الگوریتم بهینه سازی چرخه آب پرداخته می‌شود. در بخش چهارم دینامیک موتور DC معرفی می‌شود. در بخش پنجم روش پیشنهادی و در بخش ششم نتایج ارائه می‌شود. نهایتاً در بخش هفتم نتیجه‌گیری بیان می‌شود.

## ۲- معرفی عملگر کسری

محاسبات کسری تعمیمی از مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری به مرتبه غیر- صحیح با عملگر اساسی  $D_{t_0,t}^\alpha$  است که در آن  $t$  و  $t_0$  محدوده عملیات مرتبه- کسری‌اند. عملگر مشتق-انتگرالی پیوسته مذکور به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$D_{t_0,t}^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & Re\{\alpha\} > 0 \\ 1, & Re\{\alpha\} = 0 \\ \int_{t_0}^t (d\tau)^{-\alpha}, & Re\{\alpha\} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن  $\alpha$  مرتبه عملیات بوده و می‌تواند گویا، اصم یا مختلط (در حالت کلی) انتخاب شود، ولی در این مقاله  $\alpha \in R^+$  در نظر گرفته می‌شود. همچنین زمان اولیه  $t_0 = 0$  لحاظ خواهد شد [۱۶].

در حالت کلی، روش‌های مختلفی برای بسط انتگرال و مشتق مرتبه- کسری وجود دارند که هر کدام برای کاربردهای متفاوتی بکار می‌روند. اما در اکثر موارد از سه تعریف معروف گرانوالد- لتنیکف<sup>۱</sup> (GL)، ریمان- لیویل<sup>۲</sup> (RL) و کاپوتو<sup>۳</sup> (Caputo) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این مقاله از تعریف کاپوتو استفاده می‌شود در ادامه فقط این تعریف بیان می‌شود.

**تعریف ۱:** مشتق کاپوتو بصورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن  $m$  اولین عدد صحیح بزرگتر از  $\alpha$  است.

از نقطه نظر کنترلی در نظر گرفتن دینامیک چاپر باعث کاهش ریبیل جریان آرمیچر می‌شود. این امر باعث بهبود پاسخ گذرا و تنظیم بهتر سرعت می‌شود [۱].

روش پیشنهادی در این مقاله برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری به منظور تنظیم سرعت موتور روش مبتنی بر چرخه آب است. الگوریتم‌های تکاملی دارای مزیت‌هایی مانند وابسته نبودن به دینامیک سیستم و مشتق‌پذیری و فرار کردن از نقاط مینیمم محلی هستند. الگوریتم‌های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت اخیراً جایگاه خوبی در متون مهندسی پیدا کرده‌اند. این الگوریتم‌ها به عنوان روش‌های هوشمند بهینه سازی در کنار روش‌های کلاسیک نتیجه خوبی از خود نشان دادند. مشابه دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه سازی چرخه آب با یک جمعیت اولیه (قطرات باران) شروع می‌شود [۱۳]. در این میان بهترین فرد (بهترین قطره آب) به عنوان دریا انتخاب می‌شود. پس از آن، تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان رود و بقیه قطرات باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می‌شود که به سمت رودخانه‌ها و دریا جریان می‌یابند. از این الگوریتم تا کنون برای حل بسیاری از مسایل مهندسی استفاده شده است [۱۳]. در [۱۴] برای طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت از این الگوریتم استفاده شده است. در [۱۵] از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب برای بهینه سازی سیستم فازی استفاده شده است.

در نتیجه بطور خلاصه در این مقاله به عنوان یک نوآوری سعی می‌شود تا با استفاده از روش جدید بهینه سازی چرخه آب با رویکردی چند هدفه ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری بگونه‌ای تنظیم شود که عملکرد کنترلی خوبی حاصل شود. در واقع با در نظر گرفتن اهداف عملکردی، پارامترهای زیادی از جمله فراجش، زمان نشست، خطای حالت ماندگار می‌توانند بسته به اهمیت‌شان با وزن‌های مختلف با هم جمع شوند تا تابع هزینه مناسب که الگوریتم چرخه آب قصد کمینه کردن آن را دارد شکل گیرد. برای ثبات درستی عملکرد و صحت بهبود نتایج نسبت به کارهای تحقیقاتی پیشین، نتایج شبیه سازی با نتایج مقاله [۲] مقایسه خواهد شد. از نتایج کاربردی این طرح استفاده از آن در صنعت می‌باشد. بنظر می‌رسد با توجه به کاربردهای زیاد موتورهای

<sup>1</sup> Grunwald-Letnikov

<sup>2</sup> Riemann-Liouville

<sup>3</sup> Caputo

## ۲-۱- کنترل کننده PID مرتبه کسری

تا کنون روش‌های زیادی برای توسعه الگوریتم‌های کلاسیک ارائه شده است. در این میان با توجه به توانمندی ریاضیات مرتبه کسری و استفاده کارآمد از آن در حوزه علم کنترل محققان نشان داده‌اند که کنترل کننده‌های مرتبه کسری عملکرد و قوام بهتری در مقایسه با کنترل کننده‌های ساده (توان صحیح) دارند [۱۷]. بر این اساس، یکی از روش‌های توسعه و بسط کنترل کننده‌های PID کلاسیک، استفاده از کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری بر اساس حسابان کسری می‌باشند [۴ و ۱۸]. کنترل کننده‌های PID مرتبه کسری در مقایسه با کنترل کننده PID کلاسیک دارای دو درجه بیشتر هستند [۱۹]. از این رو تنظیم این کنترل کننده‌ها به مراتب پیچیده‌تر است. ساختار یک کنترل کننده PID مرتبه کسری با توجه به خطای دینامیک سیستم به صورت زیر است [۲۰]:

$$u_{pid}(t) = K_p D^\alpha e(t) + K_I D^\lambda e(t) + K_D D^\mu e(t) \quad (3)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس تابع تبدیل کنترل کننده بصورت زیر است:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (4)$$

در رابطه فوق  $K_p$  بهره تناسبی،  $K_I$  بهره انتگرالی،  $K_D$  بهره مشتقی هستند. علاوه بر این  $\lambda$  و  $\mu$  بترتیب مرتبه انتگرال‌گیر و مرتبه مشتق‌گیر هستند. همانطور که مشخص است فرق اساسی بین این کنترل کننده و یک کنترل کننده PID کلاسیک وجود همین پارامترهای  $\lambda$  و  $\mu$  هستند. همانطور که مشاهده می‌شود این کنترل کننده‌ها دارای پنج پارامتر در صورتی که کنترل کننده‌های PID کلاسیک دارای سه پارامتر هستند. در صورت تنظیم صحیح، همین دو پارامتر اضافه باعث بهبود عملکرد این کنترل کننده‌ها می‌شود. تنظیم این کنترل کننده‌ها یکی از چالش‌های استفاده از آنها در طراحی سیستم‌های کنترل است. در حالت کلی در نتیجه استفاده از این کنترل کننده‌ها برای سیستم‌های مختلف نتایج زیر در مقالات مختلف گزارش شده است [۲۱ و ۲۲]:

۱) کنترل کننده PID مرتبه کسری دارای پنج پارامتر طراحی هستند در صورتی که کنترل کننده PID کلاسیک دارای سه پارامتر طراحی هستند. بنابراین با توجه به این آزادی عمل با این

کنترل کننده‌ها می‌توان به مشخصات عملکردی بهتری دست یافت.

۲) برای سیستم‌های با مرتبه بالا عملکرد کنترل کننده PID مرتبه کسری به مراتب بهتر از کنترل کننده PID کلاسیک است.

۳) برای یک سیستم با تاخیر<sup>۱</sup> طولانی عملکرد کنترل کننده PID مرتبه کسری به مراتب بهتر از کنترل کننده PID کلاسیک است.

۴) کنترل کننده PID مرتبه کسری قوام<sup>۲</sup> و پایداری بیشتری دارد.

۵) کنترل سیستم‌های غیر خطی با استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری کم سخت است در حالی که استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری به عملکرد بهتری ختم می‌شود.

۶) استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری برای سیستم‌های نامینیمم فاز به نتیجه بهتری می‌انجامد.

۷) بیشتر سیستم‌های غیر خطی حول نقاط کاری خود خطی‌سازی می‌شوند و سپس برای نقاط کاری مختلف کنترل کننده طراحی می‌شود. در حالی که استفاد از کنترل کننده PID مرتبه کسری برای سیستم‌های غیرخطی بدون خطی سازی به نتایج خوبی منجر می‌شود.

## ۳- الگوریتم بهینه سازی چرخه آب

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی که در مهندسی با آنها روبرو هستیم بخاطر بزرگی بعد و یا پیچیدگی ریاضی به آسانی حل نمی‌شوند. در این مسائل عموماً با بزرگ شدن ابعاد مسئله، فضای جستجو هم بزرگ خواهد شد. با توجه به این نقیصه روش‌های بهینه‌سازی تحلیلی که در کتب مهندسی و متون ریاضیات بیان شده است نمی‌توانند راحل مناسبی را بیان کنند. از این رو محققان با الهام از طبیعت سعی در پیشنهاد الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید کرده‌اند. بسیاری از محققان نشان داده‌اند که الگوریتم‌ها الهام گرفته شده از طبیعت در

<sup>1</sup> Delay

<sup>2</sup> Robust

زیادی از آنها به زیر زمین فرو می‌روند. بخشی از این آب نفوذ یافته، به اعماق پایین‌تر رفته و آبخوانها را تغذیه می‌کنند (سنگ‌های زیرسطحی اشباع از آب) و حجم زیادی از آب شیرین را برای مدت‌های مدید نگهداری می‌کنند. بخشی از آب زیرزمینی نیز نزدیک به سطح زمین باقی می‌ماند و مجدداً به شکل تراوش به بدنه‌های آبی و اقیانوس‌ها باز می‌گردند و مانند تخلیه آب زیرزمینی عمل می‌کنند. برخی دیگر نیز به صورت چشمه‌های آب شیرین از زیر زمین بیرون می‌آیند. در طول زمان، این حجم آب در حال حرکت است و هر از چند گاهی بخشی از آن به اقیانوس‌ها ختم می‌یابند که همان نقطه شروع است، و باز مجدداً این مسیر طی می‌شود. این الگوریتم ابتکاری جدید از رفتار چرخه آب در طبیعت الهام گرفته شده است. آب به شکل جویبارها و رودخانه‌ها از کوهها به سمت دریاها حرکت می‌کند. در راه پایین آمدن، رودخانه‌ها و جویبارها، آب را از باران و دیگر جویبارها جمع آوری می‌کنند.

در بهینه سازی چرخه آب هر آرایه قطره آب نامیده می‌شود، که برای یک مسئله بهینه سازی  $N$  بعدی و برای یک راه حل به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Raindrop = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (5)$$

برازندگی یا ارزش هر قطره با استفاده از تابع هزینه (هدف) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_i = Cost_i = f(x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots, x_{N_{var}}^i) \quad (6)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$$

که در آن  $C_i$  مقدار تابع هدف هر قطره است. پس از تشکیل دادن  $N_{pop}$  قطره باران، تعداد  $N_{sr}$  تا از بهترین قطرات (که دارای بهترین مقادیر برازندگی یا کمترین ارزش هستند) به عنوان دریا و رود انتخاب می‌شوند. در مسایل بهینه‌سازی، قطره‌ی باران با کمترین مقدار به عنوان دریا در نظر گرفته می‌شوند. بقیه قطره‌ها به عنوان جویبارهایی که ممکن است به رودخانه یا مستقیماً به دریا بریزند با استفاده از روابط زیر، انتخاب می‌گردند.

$$N_{sr} = Number\ of\ Rivers + 1(sea) \quad (7)$$

$$N_{Streams} = N_{pop} - N_{sr} \quad (8)$$

به منظور تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودها و دریا، بسته به شدت جریان آب، از رابطه (۹) استفاده می‌شود:

$$NS_n = round \left\{ \left| \frac{Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} Cost_i} \right| \times N_{Streams} \right\} \quad (9)$$

حل دسته گسترده‌ای از مسائل مهندسی کارا عمل کرده‌اند. از این رو اخیراً تعداد زیادی از تحقیقات دانشگاهی به این حوزه تخصیص پیدا کرده است. عموماً روش‌های بهینه‌سازی معرفی شده، شبیه‌سازی کامپیوتری فرایندهایی هستند که از طبیعت الهام گرفته شده است. الهام از طبیعت نقطه شروع طراحی اکثر الگوریتم‌های بهینه سازی است. دلیل این کار بیشتر سادگی فرموله کردن آنها می‌باشد. به عنوان مثال، الگوریتم ژنتیک توسط هلند پیشنهاد شد که این الگوریتم مفاهیم تکامل داروین را مدلسازی نمود. سیستم‌های ایمنی مصنوعی نیز سیستم‌های ایمنی بیولوژیکی را برای بهینه سازی شبیه سازی کرده اند. الهام از رفتار و تلاش مورچه‌ها بهینه سازی کلونی مورچه‌ها را نتیجه داد. الگوریتم بهینه سازی پرندگان رفتار اجتماعی دسته پرندگان را که برای رسیدن به یک هدف نامشخص تلاش می‌کنند، شبیه‌سازی کرده است [۲۳].

در این میان الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب اخیراً به عنوان یک الگوریتم تکاملی که از طبیعت بهره گرفته شده است مطرح شده است [۱۳]. چرخه آب، که با نام چرخه‌ی هیدرولوژی نیز شناخته می‌شود، وجود و حرکات آب را در رو و زیر زمین و بالای سطح زمین نشان می‌دهد. آب در زمین همیشه در حال حرکت است و همیشه در حال تغییر شکل می‌باشد، از مایع به بخار، به یخ و دوباره بازگشت به حالات اول. چرخه آب میلیاردها سال است که در حال کار است و زندگی همه چیز روی زمین به آب بستگی دارد.

توده‌های هوا، ابرها را در اطراف زمین به حرکت در می‌آورند. قطعات ابر با یکدیگر برخورد کرده، رشد می‌کنند و به شکل باران به سمت پایین می‌آیند. قسمتی از این باران به شکل برف بارش روی توده های برفی و یخ ها تجمع می‌یابند. برف در نقاط گرمتر ذوب شده و به شکل نهر جاری می‌شود و تبدیل به برفاب می‌شوند. باران‌ها بر روی سطح اقیانوس‌ها ریخته می‌شوند و قسمت دیگری از آن نیاز بر روی زمین می‌یابند که در اثر جاذبه روی سطح زمین جاری شده و تبدیل به روان آب سطحی می‌شوند.

بعضی از رواناب‌های سطحی وارد رودخانه‌ها شده و در نهایت به سمت اقیانوس‌ها حرکت می‌کنند؛ برخی دیگر نیز به صورت آب شیرین در دریاها و رودخانه‌ها تجمع می‌کنند. تمام رواناب‌های بر روی سطح زمین جاری نمی‌شوند و قسمت

خواهد داشت. آشکار است که خطای زیاد نیازمند گشتاور زیاد موتور برای رساندن موتور به دور مطلوب دارد که این خود باعث افزایش جریان خواهد شد. در صورت زیاد شدن جریان مرجع ( $I_{ref}$ )، جریان آرمیچر نیز بله نوبه خود زیاد شده و در نتیجه گشتاور موتور نیز زیاد خواهد شد. از سوی دیگر در صورت کاهش جریان مرجع، جریان و گشتاور موتور هم کم خواهد شد. هدف اصلی از طراحی حلقه کنترل جریان این است که جریان آرمیچر جریان مرجع را ردگیری کند. با توجه به این مهم که اینکه المان‌های قدرت و سیم‌پیچ‌ها تا حد مشخصی جریان را می‌توانند به سلامت از خود عبور دهند لذا افزایش زیاد جریان باعث صدمه دیدن موتور خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت که حلقه کنترل جریان قلب درایو موتور DC است و از این رو طراحی آن توجه خاصی را می‌طلبد. لازم به ذکر است ولتاژ اعمالی به آرمیچر هم به مقدار خطای جریان و هم مقدار خطای سرعت وابسته است. بنابراین به یک کنترل کننده جریان نیاز خواهیم داشت تا تضمین کند که ولتاژ اعمالی در گشتاورهای مثبت و منفی از کران‌های مجاز خود بیشتر نخواهد شد [۲].

قابل توجه آنکه در حلقه داخلی چاپر به عنوان یک کنورتور بکار رفته است. در واقع با در نظر گرفتن ملاحظات عملی ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور DC را می‌توان با استفاده از چاپر کنترل نمود. از نقطه نظر کنترلی در نظر گرفتن دینامیک چاپر باعث کم شدن ریبیل جریان آرمیچر خواهد شد. این مهم باعث بهبود پاسخ گذرا و تنظیم بهتر سرعت موتور خواهد شد [۱]. چاپر کار تبدیل ولتاژ DC ثابت را به یک ولتاژ DC متغییر انجام می‌دهد و چون بر مبنای PWM<sup>۱</sup> کار می‌کند بسیار تند عمل می‌کند. از این رو کارآمدی بیشتری از بقیه المان‌های قدرت دارد. بنابراین همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است عملکرد چاپر را می‌توان با یک گین ثابت  $K_f$  نشان داد [۲].

#### ۴-۲- حلقه کنترل سرعت

در حلقه خارجی بر مبنای خطای سرعت کنترل کننده سرعت، جریان مورد نیاز موتور را فراهم خواهد کرد. همانطور که قبلاً ذکر شد در این مقاله تمرکز اصلی بر روی طراحی

$NS_n$  تعداد نهرها است که به رودخانه یا دریای معینیر می‌ریزد.

چگونگی جاری شدن جویبارها به دریا یا رودخانه با استفاده از روابط زیر محاسبه گردد:

$$x_{stream}^{i+1} = x_{stream}^i + rand \times C \times (x_{River}^i - x_{stream}^i) \quad (10)$$

$$x_{River}^{i+1} = x_{River}^i + rand \times C \times (x_{sea}^i - x_{River}^i) \quad (11)$$

که rand یک عدد تصادفی توزیع شده به صورت یکنواخت بین صفر و یک است. اگر مقدار راه حل هر کدام از جویبارها بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، وضعیت آنها تغییر می‌کند (جویبار تبدیل به رودخانه می‌گردد و رودخانه مربوطه به صورت جویبار در نظر گرفته می‌شود). همچنین وضعیت دریا و رودخانه، اگر رودخانه راه‌حل بهتری از دریا داشته باشد، جابه‌جا خواهد شد.

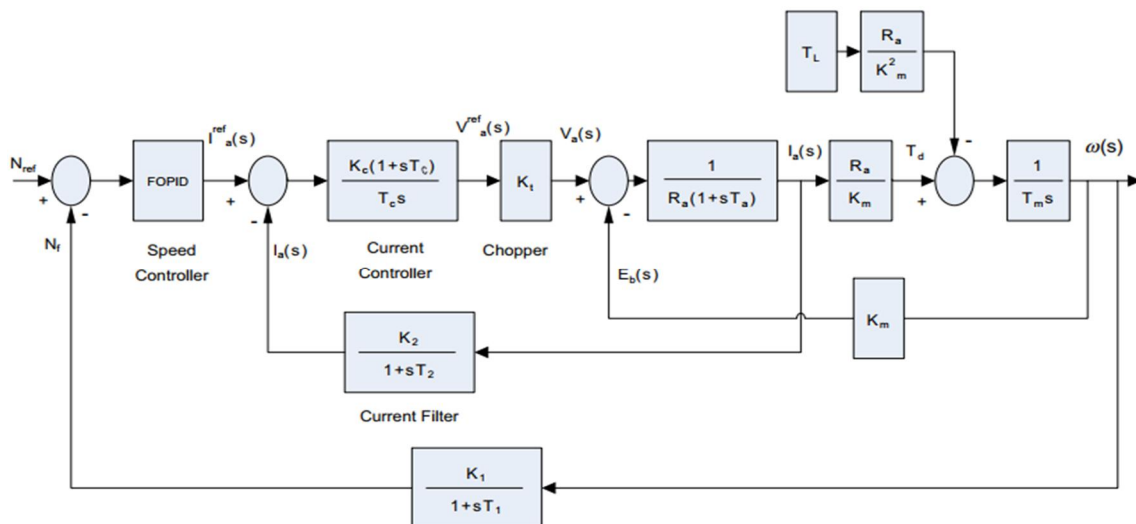
#### ۴- کنترل موتور DC

از نقطه نظر کنترلی برای کنترل سرعت درایو موتور DC یک سیستم حلقه بسته که مشتمل بر دو حلقه است استفاده می‌شود. در حلقه داخلی جریان و در حلقه خارجی سرعت کنترل خواهد شد. بلوک دیاگرام کنترل سرعت درایو موتور DC در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۴-۱- حلقه کنترل جریان

از نقطه نظر عملی می‌توان گفت بخاطر وجود ثابت زمانی مکانیکی موتور، موتور سریعاً به ورودی پاسخ نمی‌دهد. یعنی مدت زمانی طول خواهد کشید تا با اعمال ولتاژ، سرعت موتور رفته رفته زیاد شود. از سویی دیگر کنترل کننده سرعت به سرعت واکنش نشان می‌دهد. با شروع بکار موتور سرعت فیدبک شده صفر می‌باشد یعنی خطا حداکثر مقدار خود را خواهد داشت. در نتیجه چاپر حداکثر ولتاژ را به موتور اعمال خواهد کرد و چون در ابتدا ولتاژ ضد محرکه وجود ندارد جریان زیادی در موتور شارش می‌یابد. این جریان ممکن است از حد تحمل سیم پیچ‌های موتور بیشتر باشد و باعث صدمه به موتور شود. بنابراین باید به نحوی جریان آرمیچر کنترل شود. این مهم نیازمند کنترل حلقه بسته جریان را

<sup>۱</sup> Pulse Width Modulation



شکل ۱- دیاگرام کنترل سرعت درایو موتور DC [۲۴]

$$J_1 = (1 - e^{-\beta})(\gamma_1 E_{ss} + \gamma_2 Mp) + e^{-\beta}(\gamma_3 t_r + \gamma_4 t_s) \quad (12)$$

که  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  و  $\beta$  پارامترهای طراحی می‌باشند. در این میان  $t_r$  زمان صعود،  $t_s$  زمان نشست،  $E_{ss}$  خطای حالت ماندگار و  $Mp$  فراجهش می‌باشند. با هدف کمینه‌سازی و مقایسه نتایج توابع هزینه فوق استفاده شده است. هدف بهینه‌سازی پنج پارامتر سیستم کنترل است؛

جدول ۱- محدوده پارامترها

پارامتر	$\mu$	$\lambda$	$k_d$	$k_i$	$k_p$
حد پایین	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰	۰
حد بالا	۲	۲	۱	۱	۳

بنابراین ابتدا محدوده (حد بالا و پایین) آنها را مطابق جدول ۱ تعریف می‌شود. برای اعمال الگوریتم چرخه آب جمعیت اولیه ۱۰۰، تعداد رودخانه‌ها ۸ و تعداد پارامترهایی که باید توسط الگوریتم بهینه شوند ۵ می‌باشد.

### ۶- آرایه نتایج

در این قسمت ابتدا کنترل کننده کلاسیک PID و سپس کنترل کننده PID مرتبه کسری طراحی و مقایسه می‌شوند.

بهینه کنترل کننده سرعت است. کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله کنترل کننده مرتبه کسری می‌باشد. علاوه بر این به عنوان یک نوآوری تلاش می‌شود تا با استفاده از روش جدید بهینه سازی چرخه آب با رویکردی چند هدفه ضرایب کنترل کننده را بگونه‌ای بهینه کنیم که عملکرد کنترلی قابل قبولی حاصل شود.

در واقع با در نظر گرفت اهداف عملکردی، پارامترهای زیادی از جمله فراجهش، خطای حالت ماندگار و زمان نشست، بسته به اهمیت‌شان با وزن‌های مختلف با هم تجمیع خواهند شد تا تابع هزینه مناسب که الگوریتم چرخه آب قصد کمینه کردن آن را دارد شکل گیرد.

### ۵- روش پیشنهادی

با توجه به اینکه هدف مقاله تنظیم ضرایب کنترل کننده مرتبه کسری است، در این قسمت به تنظیم بهینه کنترل کننده PID مرتبه کسری جهت کنترل سرعت موتور با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه و بکارگیری الگوریتم بهینه سازی چرخه آب پرداخته می‌شود. بلوک دیاگرام ساختار کنترل کننده در شکل ۱ داده شده است. پارامترهای موتور DC مطابق مرجع [۲] انتخاب می‌شوند. برای اعمال الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب ابتدا یک معیار با رویکرد چند هدفه به عنوان تابع هزینه به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود:

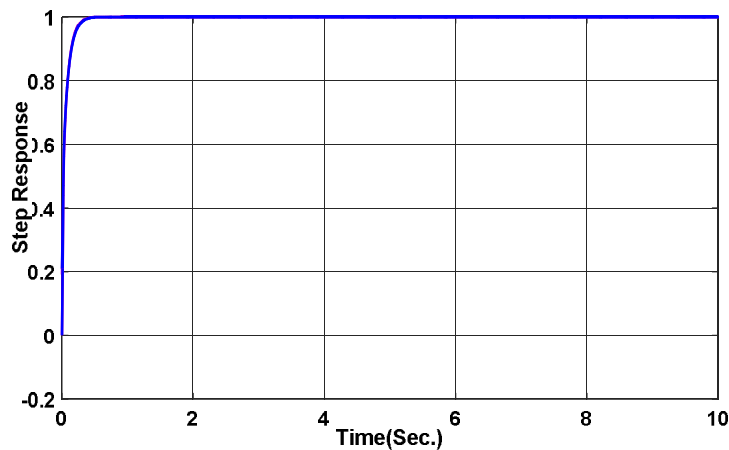
۶-۱- طراحی کنترل کننده PID بهینه

در این قسمت با توجه به تابع هزینه  $J_1$  به طراحی کنترل کننده PID بهینه مناسب با استفاده از الگوریتم چرخه آب می‌پردازیم. ضرایب  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  به ترتیب ۱، ۰/۲، ۰/۶، و ۱ انتخاب می‌شود. علاوه بر این اثر ضریب  $\beta$  بر روی عملکرد سیستم کنترل نیز بررسی شده و به ازای مقادیر متفاوت نتایج بیان خواهد شد. با اعمال الگوریتم بهینه سازی چرخه آب برای تنظیم ضرایب کنترل کننده PID، پارامترهای سیستم کنترل مورد بحث در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول آشکار است که با افزایش ضریب  $\beta$  فراجهدش بیشتر کاهش می‌یابد. شکل ۲ پاسخ ردگیری را در نتیجه اعمال الگوریتم‌های متفاوت به ازای  $\beta$  برابر ۱/۵ نشان می‌دهد. ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود ولتاژ اعمالی

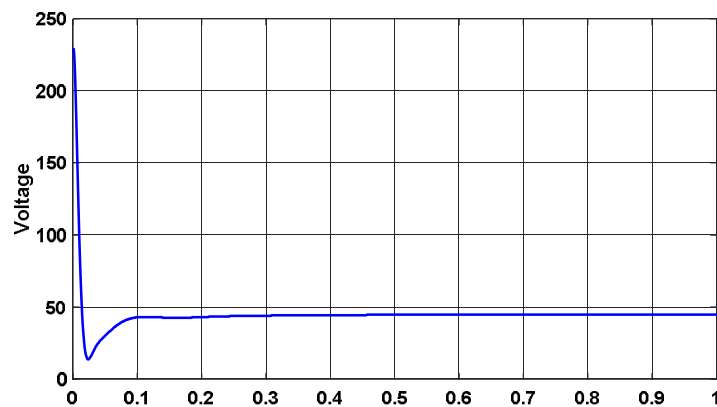
در محدوده مجاز است. این مهم از لحاظ عملی ارزشمند بوده و پیاده‌سازی سیستم کنترل طراحی شده را آسان می‌کند. تابع هزینه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود الگوریتم چرخه آب با سرعت خوبی بعد از ۱۷ تکرار به مقدار مینیمم خود همگرا شده است.

جدول ۲- پارامترهای سیستم کنترل بهینه شده

Criteria	Controller	$\beta$	$t_s$	$t_r$	$Mp$	$E_{ss}$
		۰/۴	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۰۱۱	۰
$J_1$	WCA-PID	۱	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۰۰۱۷	۰
		۱/۵	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۰۰۱۱	۰

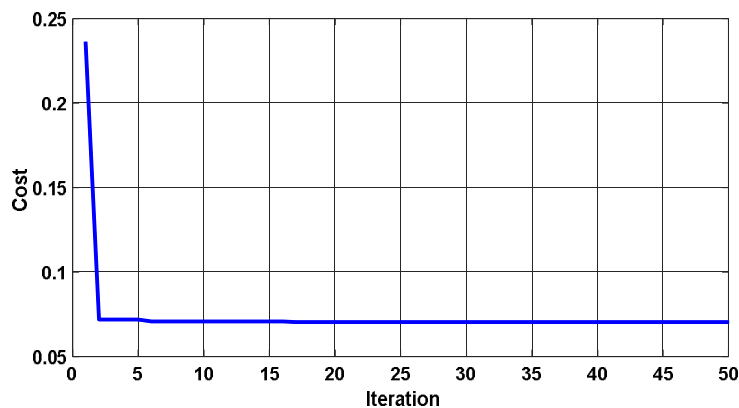


شکل ۲- پاسخ پله با کنترل کننده PID



شکل ۳- ولتاژ اعمالی موتور





شکل ۴- تابع هزینه

کلاسیک است و این آزادی عمل باعث افزایش توانایی الگوریتم بهینه سازی چرخه آب در پیدا کردن جواب بهینه می‌شود. تابع هزینه الگوریتم چرخه آب در فرآیند بهینه سازی ضرایب کنترل کننده PID مرتبه کسری در شکل ۶ نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر تابع هزینه الگوریتم چرخه آب در فرآیند بهینه سازی ضرایب کنترل کننده PID کلاسیک نیز در شکل ۶ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم چرخه آب به خوبی همگرا شده و تقریباً بعد از ۴ تکرار به جوابی بهتر از قبل رسیده است.

برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل کننده طراحی شده در سرعت‌های دیگر، ورودی مرجع  $55 \text{ rad/s}$  انتخاب می‌شود. نتایج بدست آمده با مرجع [۲] مقایسه می‌شوند. در این مرجع از الگوریتم زنبور عسل<sup>۲</sup> (ABC) و الگوریتم پرندگان<sup>۳</sup> (PSO) برای بدست آوردن ضرایب کنترل کننده استفاده شده است. برای مقایسه پاسخ هر سه مورد گزارش شده در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پاسخ سیستم در نتیجه اعمال کنترل کننده PID بهینه شده با الگوریتم چرخه آب از نقطه نظر فراجاهش، زمان صعود و زمان نشست در مقایسه با الگوریتم زنبور عسل و پرندگان بهتر عمل کرده است. توجه شود که هر سه الگوریتم نهایتاً به خطای حالت ماندگار صفر رسیده‌اند.

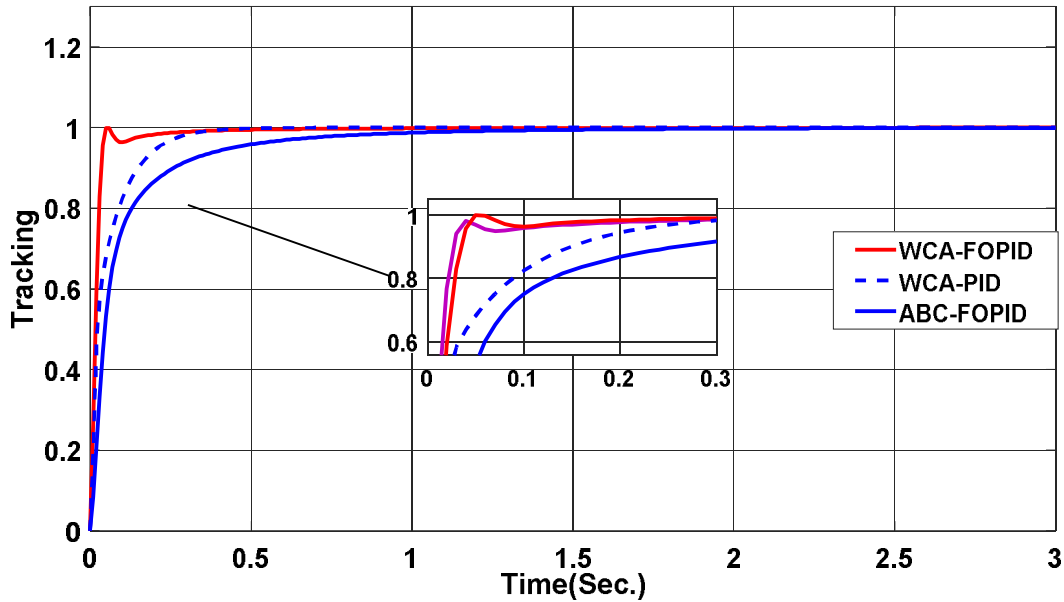
#### ۶-۲- طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری

در این قسمت با توجه به در نظر گرفتن تابع هزینه  $J_1$  به طراحی کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه با استفاده از الگوریتم چرخه آب می‌پردازیم. چون بهترین پاسخ در قسمت قبل با  $\beta = 1.5$  بدست آمد و در ادامه می‌خواهیم نتایج کنترل کننده PID مرتبه کسری را با آن نتایج مقایسه کنیم ضرایب تابع هزینه مشابه قسمت قبل در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه اعمال الگوریتم بهینه سازی چرخه آب پارامترهای بهینه شده سیستم کنترل در جدول ۳ آمده است. برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل کننده طراحی شده، نتایج بدست آمده با مرجع [۲۵] مقایسه می‌شوند. در این مرجع از الگوریتم زنبور عسل<sup>۱</sup> (ABC) برای بدست آوردن ضرایب کنترل کننده استفاده شده است. برای مقایسه بهتر نتایج قسمت قبل نیز در جدول ۳ آورده شده است. علاوه بر این پاسخ سیستم کنترل با استفاده از هر دو کنترل کننده PID و FOPID در شکل ۵ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با توجه به شکل ۵ کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم چرخه آب عملکرد خوبی داشته است. در مقایسه با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۵] الگوریتم چرخه آب بسیار سریعتر عمل کرده است. این کنترل کننده دارای زمان صعود و نشست کمتر است. این نتیجه دور از انتظار نبود زیرا همانطور که قبلاً بیان شد کنترل کننده PID مرتبه کسری دارای دو درجه آزادی بیشتر از کنترل کننده PID

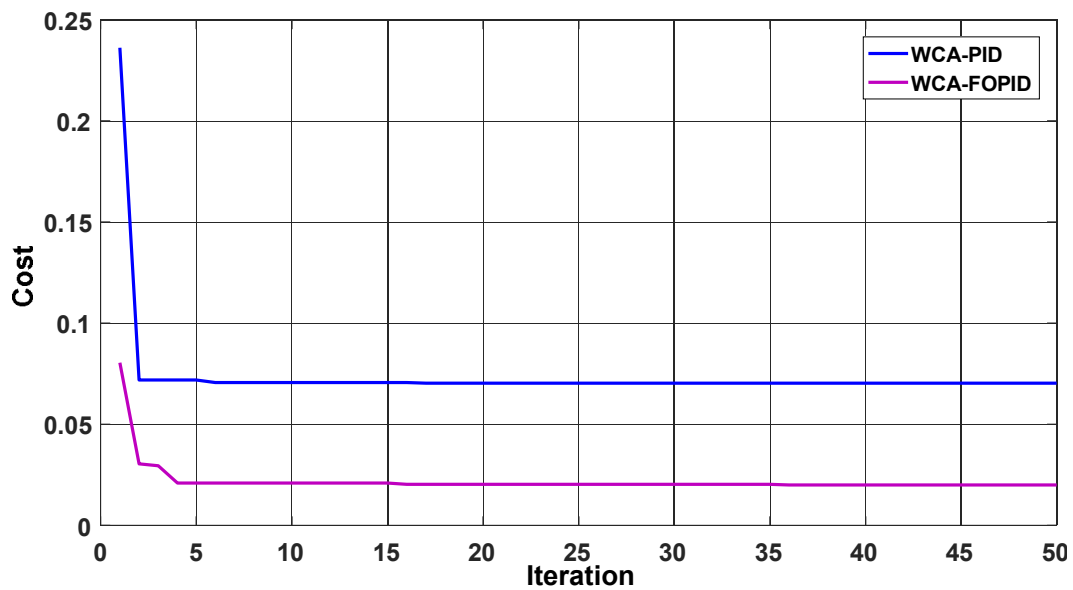
<sup>۲</sup> Artificial Bee Colony (ABC)<sup>۳</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)<sup>۱</sup> Artificial Bee Colony (ABC)

جدول ۳- ضرایب بهینه کنترل کننده FOPID

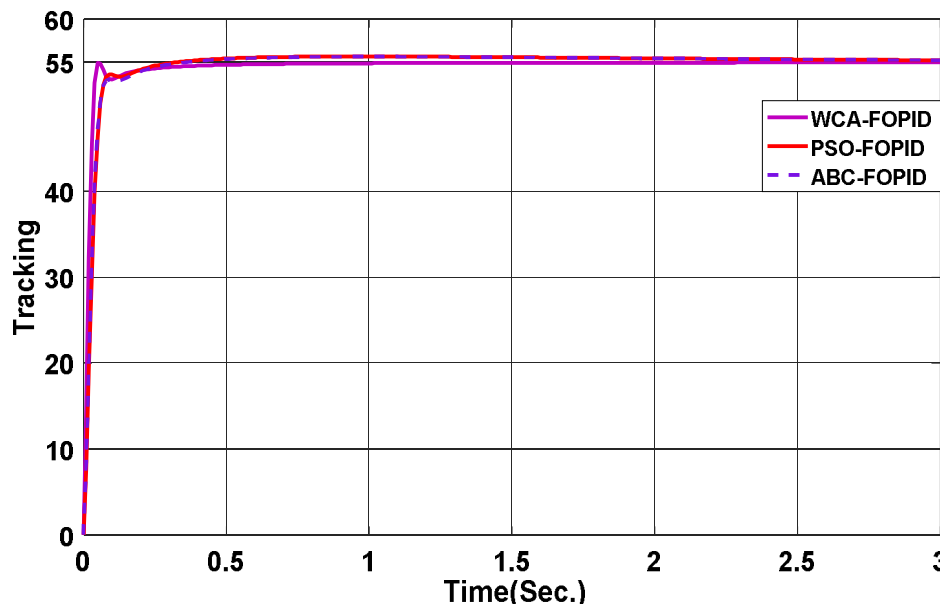
Controller	$k_p$	$k_i$	$k_d$	$\lambda$	$\mu$	$t_s$	$t_r$	$M_p$	$E_{ss}$
WCA-FOPID	۲/۱۳۲۸	۰/۸۵۱۹	۰/۴۱۸۲	۱/۰۸۶۵	۱/۳۰۰۲	۰/۰۸	۰/۴۶	۰	۰
ABC-FOPID [25]	۲	۱/۹۷۶۲	۱/۹۱۳۹	۰/۱۲۰۷	۰/۴۸۳۷	۰/۴۵	۱/۱۲	۰	۰



شکل ۵- پاسخ پله با کنترل کننده PID مرتبه کسری



شکل ۶- مقایسه تابع هزینه



شکل ۷- مقایسه پاسخ سه الگوریتم

for chopper fed DC motor drive using opposition based artificial bee colony algorithm. Eng Appl Artif Intell 29(2): 13-32.

- [3] Zhao C, Xue D, Chen Y (2005) A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. in Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference.
- [4] Milos S, Martin C (2006) The fractional order PID controller outperforms the classical one. in Proc. 7th Int. Sci. & Tech. Conf.-Process Control.
- [5] Das S (2011) Functional fractional calculus. Springer Science & Business Media.
- [6] Podlubny I (1999) Fractional-order systems and PI/sup  $\lambda$ /D/sup  $\mu$ -controllers. IEEE Trans Automat Contr 44(1): 208-214.
- [7] Tavazoei MS, Haeri M (2008) Chaos control via a simple fractional-order controller. Phys Lett A 372(6): 798-807.
- [8] Mellouli E, Sefriti S, Boumhidi I (2011) Direct adaptive fuzzy control for an uncertain three-tank-system. Int J Res Rev ARTIF INTELL 1(4).
- [9] Axtell M, Bise ME (1990) Fractional calculus application in control systems. in Aerospace and Electronics Conference, 1990. NAECON 1990., Proceedings of the IEEE 1990 National.
- [10] Zamani M, Karimi-Ghartemani M, Sadati N, Parniani M (2009) Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. Control Eng Pract 17(12): 1380-1387.
- [11] Hemati N, Thorp JS, Leu MC (1990) Robust nonlinear control of brushless DC motors for direct-drive robotic applications. IEEE Trans Ind Electron 37(6): 460-468.

#### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به کنترل سرعت موتور DC با در نظر گرفتن دینامیک درایو و چاپر با کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه با الگوریتم بهینه سازی چرخه آب پرداخته شد. قابل توجه آنکه ولتاژ اعمالی به آرمیچر موتور DC را می توان با استفاده از چاپر کنترل کرد. از نقطه نظر کنترلی در نظر گرفتن دینامیک چاپر باعث کاهش ریبیل جریان آرمیچر می شود. این امر باعث بهبود پاسخ گذرا و تنظیم بهتر سرعت می شود. نتایج نشان داد که در صورتی که این کنترل کننده به درستی تنظیم شود دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک می باشد. در این مقاله برای تنظیم دقیق کنترل کننده PID مرتبه کسری از الگوریتم جدید بهینه سازی چرخه آب استفاده شد. نتایج با الگوریتم پرنندگان و زنبور عسل که در مراجع بیان شده اند مقایسه شد. نتایج نشان داد که کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه شده با الگوریتم چرخه آب هم دارای همگرایی بسیار خوبی می باشد و هم به مراتب عملکرد بهتری دارد.

#### ۸- مراجع

- [1] Bakshi UA, Bakshi MV (2009) Electrical drives and control. Technical Publications.
- [2] Rajasekhar A, Jatoth RK, Abraham A (2014) Design of intelligent PID/PI  $\lambda$  D  $\mu$  speed controller

- [19] Padula F, Visioli A (2011) Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers. *J Process Control* 21(1): 69-81.
- [20] Zeng GQ, Chen J, Dai YX, Li LM, Zheng CW, Chen MR (2015) Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization. *Neurocomputing* 160: 173-184.
- [21] Shah P, Agashe S (2016) Review of fractional PID controller. *Mechatronics* 38: 29-41.
- [22] Xue D, Chen Y (2002) A comparative introduction of four fractional order controllers. in *Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on*.
- [23] Binitha S, Sathya SS (2012) A survey of bio inspired optimization algorithms. *Int J Soft Comput Eng* 2(2): 137-151.
- [24] Haji Haji V, Monje CA (2018) Fractional-order PID control of a chopper-fed DC motor drive using a novel firefly algorithm with dynamic control mechanism. *Soft Comput* 22(18): 6135-6146.
- [25] Rajasekhar A, Das S, Abraham A (2013) Fractional order PID controller design for speed control of chopper fed DC motor drive using artificial bee colony algorithm. in *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2013 World Congress on*.
- [12] PeLczewski PM, Kunz UH (1990) The optimal control of a constrained drive system with brushless dc motor. *IEEE Trans Ind Electron* 37(5): 342-348.
- [13] Eskandar H, Sadollah A, Bahreininejad A, Hamdi M (2012) Water cycle algorithm—A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Comput Struct* 110: 151-166.
- [14] Khodabakhshian A, Esmaili MR, Bornapour M (2016) Optimal coordinated design of UPFC and PSS for improving power system performance by using multi-objective water cycle algorithm. *Int J Elec Power* 83: 124-133.
- [15] Sarvi M, Avanaki IN (2015) An optimized fuzzy logic controller by water cycle algorithm for power management of stand-alone hybrid green power generation. *Energ Convers Manage* 106: 118-126.
- [16] Anastassiou GA (2011) *Advances on fractional inequalities*. Springer Science & Business Media.
- [17] Cao JY, Cao BG (2006) Design of fractional order controllers based on particle swarm optimization. in *Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on*.
- [18] Zhao C, Xue D, Chen Y (2005) A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order plants. in *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*.