

بهینه سازی ضرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کنترل دور موتور بدون جاروبک با الگوریتم بهینه سازی چرخه آب

حبیب اله خدادادی^۱، مصطفی اسمعیل بیگ^{۲*}، نجمه چراغی شیرازی^۳

۱: گروه برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران، habiballah.khodadadi@yahoo.com

*۲: گروه برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران، me_beag@yahoo.com

۳: گروه برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران، nch_shirazi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

چکیده

در دهه های گذشته تعداد زیادی از کنترل کننده های سرعت برای کنترل سرعت موتورهای بدون جاروبک طراحی شده اند. به طور معمول، کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی انتخاب بهینه برای کنترل سرعت موتورهای بدون جاروبک است که می توان با طراحی پارامترهای سیستم کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی، سرعت موتورهای بدون جاروبک را کنترل کرد. بدست آوردن پارامترهای مشتقی، انتگرالی و تناسبی کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی همواره جزء مشکلات مهندسی کنترل بوده است. روشهای زیادی برای بدست آوردن بهینه پارامترهای کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی وجود دارد. یکی از روشهای که بسیار زیاد از آن برای بدست آوردن و طراحی پارامترهای کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی استفاده شده است الگوریتم های بهینه سازی هستند. الگوریتم بهینه سازی چرخه آب یک الگوریتم بهینه سازی است که با استفاده از آن کار طراحی و بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی انجام می گیرد. در این مقاله با استفاده از الگوریتم چرخه آب ضریب مشتقی برابر ۰ ضریب انتگرالی برابر ۰.۲۲۵۹۹۳۷ و ضریب تناسبی ۰.۰۱۸۸۸۹۴ بدست آمده است که معیار پایداری برابر ۰.۰۱۰۳۸۴۳۳، زمان صعود برابر ۰.۰۰۹۶۲ ثانیه، زمان نشست نمودار برابر ۰.۰۱۴۹۲ ثانیه، زمان اوج برابر ۰.۰۱۸۱۷ ثانیه و کمترین مقدار نشست نمودار برابر ۰.۹۰۵۹ را بدست می آورد. این نتایج در مقایسه با نتایج بدست آمده از الگوریتم های ازدحام ذرات و ژنتیک و غیره قرار گرفته است و بهتر بودن روش چرخه آب را نمایش می دهد.

واژه های کلیدی: الگوریتم چرخه آب، کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی، کنترل سرعت، موتور بدون جاروبک

۱- مقدمه

در طول دهه های گذشته، الگوریتم های مختلفی برای حل انواع مشکلات بهینه سازی مهندسی محدود ارایه شده اند. اکثر این الگوریتم ها بر اساس روش های برنامه ریزی خطی و غیر خطی عددی هستند که ممکن است نیاز به اطلاعات قابل توجهی داشته باشند و معمولاً به دنبال بهبود راه حل در محدوده نقطه شروع هستند. این الگوریتم های بهینه سازی عددی یک استراتژی مفید برای به دست آوردن بهترین راه حل بهینه برای مدل های ساده و ایده آل هستند.

یکی از الگوریتم های بهینه سازی که طی سالهای اخیر ارائه شده است الگوریتم بهینه سازی چرخه آب [1]-[4] است. با استفاده از این الگوریتم مشکلات طراحی مهندسی متعددی حل شده است. یکی از مشکلات طراحی مهندسی انتخاب پارامترهای سیستم کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی است که این کنترل کننده یکی از رایج ترین کنترل کننده ها در بخش مهندسی کنترل است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور، کنترل فشار، کنترل دما و غیره کاربرد دارد.

یکی از کاربردهای این کنترل کننده کنترل سرعت موتورهای بدون جاروبک است. امروزه موتورهای بدون جاروبک به طور گسترده ای در تجهیزات صنعتی، خانگی و الکترونیکی به دلیل قابلیت اطمینان بالا، راندمان بالا، نگهداری پایین و بسیاری از مزایای دیگر استفاده می شود. اما معایبی هم دارند که از جمله آن کموتاتسیون الکترونیکی آن است و این امر نیاز به کنترل کننده سرعت (دور) برای

این نوع از موتور اجتناب ناپذیر می کند. پارامترهای کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی با فرمول ۱ معرفی می شوند

$$y(t) = k_p \times e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

که در اینجا k_p و k_i و k_d به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی و مشتقی نامیده می شوند. برای یک کنترلر بهینه، پارامترهای کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی به گونه ای باید انتخاب شوند که کمترین فراجهدش و بیشترین سرعت در رسیدن به وضعیت پایدار و غیره را داشته باشد. جهت بدست آوردن پارامترهای تناسبی انتگرالی مشتقی روشهای مختلفی از جمله الگوریتم های بهینه سازی، روش کنترل فازی و روش کنترل عصبی و دیگر روشها استفاده شده است.

متداول ترین روش تنظیم دستی حلقه بسته تنظیم Ziegler Nichols است [5]. حذف کامل خطای حالت پایدار هر فرآیند با تنظیم دستی امکان پذیر نیست. برای حل این مشکل عمدتاً از طرح کنترلر بهینه سازی پارامترها بوسیله الگوریتم های بهینه سازی استفاده می شود. به طور کلی، هیچ روش محاسباتی تکاملی بهترین گزینه برای همه بهینه سازی ها نیست. هر بهینه سازی منطقه برنامه کاربردی خود را دارد.

الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه کنترل کننده به عنوان اولین الگوریتم در دنیا ارائه شده است. با این وجود، این تکنیک بهینه سازی بسته به اندازه سیستم مورد بررسی، نیاز به مدت زمان طولانی دارد. همچنین، از تنظیمات پارامترهای الگوریتم رنج می برد که باعث تکرار راه حل های مشابه پایین تر می شوند. طراحی مبتنی بر بهینه سازی ازدحام ذرات الگوریتمی است که به نسبت الگوریتم ژنتیک از زمان کوتاه تری استفاده می کند و تنظیمات پارامترهای الگوریتم ساده تر است. با این حال، الگوریتم ازدحام ذرات از خوش بینی مغرضانه رنج می برد، که باعث می شود در تنظیم سرعت و مسیر آن دقت کمتری صورت گیرد. علاوه بر این، الگوریتم از همگرایی ضعیف در مرحله جستجوی پیشرفته رنج می برد، قابلیت جستجوی محلی ضعیف دارد و الگوریتم ممکن است به دام احتمالی در راه حل های بهینه محلی منجر شود [6].

به منظور غلبه بر این اشکالات و وضوح بهتر، اخیراً محققان الگوریتم چرخه آب را ارائه کردند. الگوریتم چرخه آب در گروه الگوریتم های فراابتکاری طبقه بندی می شود. الگوریتم چرخه آب یک الگوریتم جستجوی جدید است که بر اساس چرخه آب در کره زمین شکل گرفته است. مطالعات مقدماتی نشان می دهد که الگوریتم چرخه آب برای حل مشکلات بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بهتر است. البته با توجه به رشد و توسعه الگوریتم های مختلف در زمینه بهینه سازی عمدتاً الگوریتم ها نقاط ضعف و قوت خود را در مسائل بهینه سازی نسبت به دو الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات می سنجند زیرا که این دو الگوریتم از مقبولیت خاص در بین محققان برخوردار هستند.

این پژوهش مدل کنترل کننده سرعت مبتنی بر کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی برای موتور بدون جاروبک که پارامترهای کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی بوسیله الگوریتم چرخه آب بدست می آید را ارائه می دهد.

روشهای دیگری نیز برای کنترل دور موتور بدون جاروبک وجود دارد که از این روشها می توان به [7]، که یک الگوریتم کرم شب تاب (FA) به منظور کنترل مؤثر گشتاور و سرعت، برای موتور بدون جاروبک است برای دستیابی به یک کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی مرتبه کسری (FOPID) ارائه شده است اشاره کرد. در [5] از طراحی و پیاده سازی الگوریتم گرده افشانی گل که از طبیعت الهام گرفته است برای کنترل سرعت موتور بدون جاروبک با تنظیم بهینه کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی استفاده شده است. در [8] تکنیک بهینه سازی ازدحام ذرات و روش های باکتریایی (BF) برای تعیین پارامترهای بهینه کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی برای کنترل سرعت موتور بدون جاروبک که در آن موتور در مدل شبیه ساز سیمولینک در محیط نرم افزار متلب شبیه سازی می شود استفاده می شود. در [9]، طراحی کنترل کننده تناسبی مشتقی فازی و کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی فازی برای کنترل سرعت درایو موتور بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت مانند ازدحام ذرات، جستجوی فاخته و الگوریتم های خفاش انجام می شود. در [6] کنترلر سرعت موتور بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم بهینه سازی خفاش برای سیستم استنتاج عصبی-فازی انطباقی (online) استفاده شده است. علاوه بر این، تنظیم پارامترهای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی، کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی فازی و کنترل کننده منطق فازی انطباقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی ازدحام ذرات و الگوریتم خفاش طراحی و بدست آمده است. در [9]، طراحی کنترل کننده تناسبی-مشتقی فازی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی فازی برای کنترل سرعت درایو موتور بدون جاروبک استفاده شده است. بهینه سازی طراحی

کنترل کننده های فوق با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت مانند ازدحام ذرات ، جستجوی فاخته و الگوریتم های خفاش انجام می شود. در [10] یک مدل کامل از موتور بدون جاروبک و طراحی یک کنترل کننده بهینه برای کنترل موقعیت آن آمده است. برای کنترل از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده می شود که از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک بهینه ساز جهانی برای یافتن ظرایب تناسبی-انتگرالی-مشتقی بهینه شده برای کنترل موقعیت موتور بدون جاروبک استفاده شده است. در [11] دو الگوریتم بهینه سازی جمعیتی ارائه شده است: الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات و الگوریتم کرم شب تاب برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی درایو موتور بدون استفاده شده است. در [12] تنظیم سرعت موتور جریان بدون جاروبک بهینه شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات ارائه شده است. در [13] کاربردهای خودرو، وسایل نقلیه الکتریکی و اتوبوس های الکتریکی که بر اساس ماشین الکتریکی ساخته می شوند و کنترل جریان الکتریکی موتور که تنها راه حل ممکن برای تغییر سرعت آن است بیان شده است. روش بهینه سازی ازدحام ذرات یکی از راه حل های بهینه سازی است که در این مقاله با استفاده از این ابزار بهینه سازی به یافتن پارامترهای تناسبی - انتگرال بهینه برای کنترل سرعت موتور بدون جاروبک می پردازد. در [14] یک طرح کنترل برای موتور بدون جاروبک بر اساس تنظیم پارامترهای سطح حالت کشویی با الگوریتم جستجوی فاخته ایجاد شده است. در [15] استفاده از الگوریتم ژنتیک و تکنیک شبیه سازی آنیل (SA) برای طراحی و تجزیه و تحلیل بهینه یک موتور بدون جاروبک ارائه شده است. در [16] الگوریتم های بهینه سازی سینوس کسینوس و ازدحام ذرات برای تعیین پارامترهای بهینه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی و کنترل کننده های فوق پیش از کنترل سرعت موتور بدون جاروبک استفاده شده است.

۲- مدل سازی روش پیشنهادی

تمامی سیگنالها و مدلها تابع هدف که در اینجا کنترل کننده سرعت موتورهای بدون جاروبک است در نرم افزار متلب شبیه سازی می شود. از الگوریتم چرخه آب را برای بدست آوردن پارامترهای کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی استفاده می شود. در ابتدا به مدل سازی الگوریتم چرخه آب می پردازیم [3]-[1].

برای مدل سازی و پیاده سازی الگوریتم چرخه آب مثل هر الگوریتم دیگری نیاز به یک جمعیت اولیه داریم که این جمعیت اولیه را نهرها پس از بارندگی تشکیل می دهند.

$$N_{pop} = \text{جمعیتی از نهرها پس از بارندگی} \quad (2)$$

$$\text{Random Total Population} = \begin{bmatrix} \text{Stream}_1 \\ \text{Stream}_2 \\ \text{Stream}_3 \\ \vdots \\ \text{Stream}_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & X_3^1 & \dots & X_D^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & X_3^2 & \dots & X_D^2 \\ X_1^3 & X_2^3 & X_3^3 & \dots & X_D^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & X_3^{N_{pop}} & \dots & X_D^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Cost}_i = f(\text{Individual}_i) = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_D) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \quad (4)$$

در اینجا N_{pop} جمعیت داریم که ارزش هر جمعیت Cost_i مشخص می شود و در یک ماتریس n بعدی قرار می گیرد و سپس از بالاترین ارزش تا پایین ترین ارزش یا برعکس (بنا به ماهیت مسئله که در مسئله مینیمم یا ماکزیمم اهمیت دارد) در یک ماتریس D بعدی سورت می شود.

الگوریتم چرخه آب به سه پارامتر کاربر نیاز دارد: (۱) اندازه جمعیت N_{pop} ، (۲) تعداد رودخانه ها و دریا N_{SR} و (۳) d_{max} اولیه.

$$N_{SR} = \text{Number of River} + 1 \quad (5)$$

در اینجا ۱ عدد دریا است.

$$N_{Streams} = N_{pop} - N_{SR} \quad (6)$$

$$\text{Sort Total Population} = \begin{bmatrix} \text{Sea} \\ \text{River}_1 \\ \text{River}_2 \\ \text{River}_3 \\ \text{Stream}_4 \\ \text{Stream}_5 \\ \text{Stream}_6 \\ \vdots \\ \text{Stream}_{N_{pop}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & X_3^1 & \dots & X_D^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & X_3^2 & \dots & X_D^2 \\ X_1^3 & X_2^3 & X_3^3 & \dots & X_D^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & X_3^{N_{pop}} & \dots & X_D^{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

با توجه به N_{SR} بدست آمده از ۵ و $N_{Streams}$ از ۶ عمل سورت جمعیت انجام می شود. حال با توجه به میزان شدت جریان در دریا و رودخانه ها، جهت تخصیص نهرها به دریا و رودخانه ها از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$C_n = Cost_n - Cost_{N_{sr}+1} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{و} \quad N_{sr} \quad (8)$$

$$NS_n = \text{Round} \left\{ \left[\frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{SR}} Cost_i} \right] \times N_{Streams} \right\} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{و} \quad N_{SR} \quad (9)$$

در اینجا پارامتر NS_n تعداد نهرهای است که به سمت رودخانه و دریا حرکت کرده است.

حرکت نهرها به سمت دریا

$$\bar{X}_{Stream}^{t+1} = \bar{X}_{Stream}^t + rand \times C \times (\bar{X}_{Sea}^t - \bar{X}_{Stream}^t) \quad (10)$$

حرکت نهرها به سمت رودخانه ها

$$\bar{X}_{Stream}^{t+1} = \bar{X}_{Stream}^t + rand \times C \times (\bar{X}_{River}^t - \bar{X}_{Stream}^t) \quad (11)$$

حرکت رودخانه ها به سمت دریا

$$\bar{X}_{River}^{t+1} = \bar{X}_{River}^t + rand \times C \times (\bar{X}_{Sea}^t - \bar{X}_{River}^t) \quad (12)$$

$$1 \leq C \leq 2 \quad (13)$$

در این مدل سازی \bar{X}_{Stream}^{t+1} موقعیت نهر در محل جدید (تکرار بعدی) و \bar{X}_{Stream}^t موقعیت فعلی نهر است و \bar{X}_{Sea}^t موقعیت فعلی دریا، \bar{X}_{River}^t موقعیت فعلی رودخانه، \bar{X}_{River}^{t+1} موقعیت جدید رودخانه است و C عدد ثابت بین ۱ و ۲ است و $rand$ عدد تصادفی بین صفر و یک است. اگر راه حل داده شده توسط یک نهر بهتر از رودخانه تخصیص دهنده آن باشد، موقعیت های رودخانه و نهر عوض می شود. یک تعویض مشابه برای یک رودخانه و دریا و همچنین نهر و دریا نیز انجام می شود. در قسمت بعد به مدل سازی شرط تبخیر می پردازیم. این شرط زمانی رخ می دهد که دو شرط زیر رخ دهد:

۱. اگر فاصله اقلیدسی بین دریا و رودخانه از یک حد کوچکتر شد و به اصطلاح بهبود بسیار سخت شود ما شرط تبخیر و بارندگی مجدد را خواهیم داشت.

$$\text{If} \|\bar{X}_{Sea}^t(t) - \bar{X}_{River}^t(t)\| < d_{max}(t) \quad \text{or} \quad rand < 0.1 \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad \text{و} \quad N_{sr} - 1$$

Evaporation and Raining Process

End

(14)

۲. اگر فاصله اقلیدسی بین دریا و نهر از یک حد کوچکتر شد و به اصطلاح بهبود بسیار سخت شود ما شرط تبخیر و بارندگی مجدد را خواهیم داشت.

$$\text{If} \|\bar{X}_{Sea}^t(t) - \bar{X}_{Stream}^t(t)\| < d_{max}(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad \text{و} \quad N_1(\text{Sea})$$

Evaporation and Raining Process

End

(15)

$$d_{max}(t+1) = d_{max}(t) - \frac{d_{max}(t)}{\text{Max Iteration}} \quad (16)$$

d_{max} بسیار نزدیک به صفر است. این به این دلیل است که ما دیگر در این فضا جستجو نداشته باشیم و به سراغ دیگر پارامترها و

جستجو های دیگر برویم.

بهینه سازی ظرایب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی دور موتور بدون جاروبک با الگوریتم بهینه سازی چرخه آب

بعدا از برقرار شدن شرط تبخیر و بارندگی باز یک سری نهر جدید در فضای بین حد بالا و حد پایین ایجاد می شوند که پروسه حرکت را دوباره ایجاد می کنند و این پروسه مجددا تکرار می شود تا جای که ما به بهینه مطلق و یا بهینه نزدیک مطلق برسیم.

$$\vec{X}_{Stream}^{New} = \vec{LB} + rand \times (\vec{UB} - \vec{LB}) \quad (17)$$

جهت مدل سازی یک موتور بدون جاروبک سه فاز با اتصال ستاره استاتور و دو قطب با روتور بدون برجستگی را در نظر می گیریم. جهت استخراج معادلات دیفرانسیل موتور موارد زیر در نظر گرفته می شود. در نظر نگرفتن تلفات در هسته موتور و همچنین اعوجاج میدان مغناطیسی در فاصله هوایی و اثر عکس العمل آرمیچر و اثر دندانه اره ای استاتور. در کل فرض می شود که موتور و سیم پیچها ایده ال هستند. فرض می شود که کلید های قدرت و دیود های هرز گرد ایده ال هستند. مشخصات دینامیکی موتورهای بدون جاروبک بسیار شبیه موتورهای آهنربای دائمی جریان مستقیم است. معادلات مشخصه موتورهای بدون جاروبک را می توان در [17] نشان داد. در نتیجه فرمول قسمت الکتریکی را می توان به شکل زیر نوشت:

$$\mathbf{u}_{opp}(t) = R\mathbf{i}(t) + (L - M)\frac{d\mathbf{i}(t)}{dt} + \mathbf{e}_{emf} \quad (18)$$

فرمول مکانیکی موتور به شرح زیر است:

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = \sum \tau_i \quad (19)$$

در اینجا بار اینرسی J برابر شتاب زاویه ای و برابر با تعداد کل گشتاورها τ_i است. گشتاور تولید شده $\tau(t)$ متناسب با جریان $i(t)$ به فرم زیر است.

$$\mathbf{e}_{emf}(t) = K_b \omega(t) \quad (20)$$

$$\tau(t) = K_m i(t) \quad (21)$$

که K_b ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی و K_m ثابت آرمیچر است، که هر دو به خصوصیات فیزیکی موتور مانند قدرت میدان مغناطیسی و تعداد چرخش سیم پیچ مربوط می شوند. از ۲۰ و ۲۱ عبارت زیر بدست آمده است:

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = K_m i(t) - K_f \omega(t) \quad (22)$$

که K_f ضریب اصطکاک است و شدت اصطکاک $K_f \omega(t)$ نتیجه اصطکاک در موتور است. این دو معادله دیفرانسیل ۱۸ و ۲۲ که سیستم را توصیف می کنند معادلات مشخصه را در نمایش فضای حالت را بدست می آورند.

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L-M}i(t) - \frac{K_b}{L-M}\omega(t) + \frac{1}{L-M}u_{app}(t) \quad (23)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{K_m}{J}i(t) - \frac{K_f}{J}\omega(t) \quad (24)$$

معادلات مدل فضای حالت موتور بدون جاروبک را می توان به عنوان ترکیبی خطی از متغیرهای حالت و ورودی بازنویسی کرد، بنابراین ۲۳ و ۲۴ تبدیل می شوند به معادلات زیر:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} -\frac{R}{L-M} & -\frac{K_b}{L-M} \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{K_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_{app}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

که جریان $i(t)$ و سرعت زاویه ای $\omega(t)$ دو پارامتر حالت هستند و متغیر ورودی اعمال شده ولتاژ $u_{app}(t)$ است و خروجی $y(t)$ سرعت زاویه ای است. با توجه به فرمول ۱ تابع تبدیل یک کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی به صورت زیر نوشته می شود

$$\mathbf{G}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (26)$$

در نهایت تابع انتقال موتور بدون جاروبک با استفاده از ۲۶ و ۲۳ و ۲۴ به شکل زیر بدست می آید.

$$\mathbf{G}(s) = \frac{w(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{J(L-M)s^2 + (RJ + K_f(L-M))s + RK_f + K_b K_m} \quad (27)$$

معادله $G(s)$ تابع انتقال حلقه بسته موتور بدون جاروبک است.

۳- روش انجام پژوهش

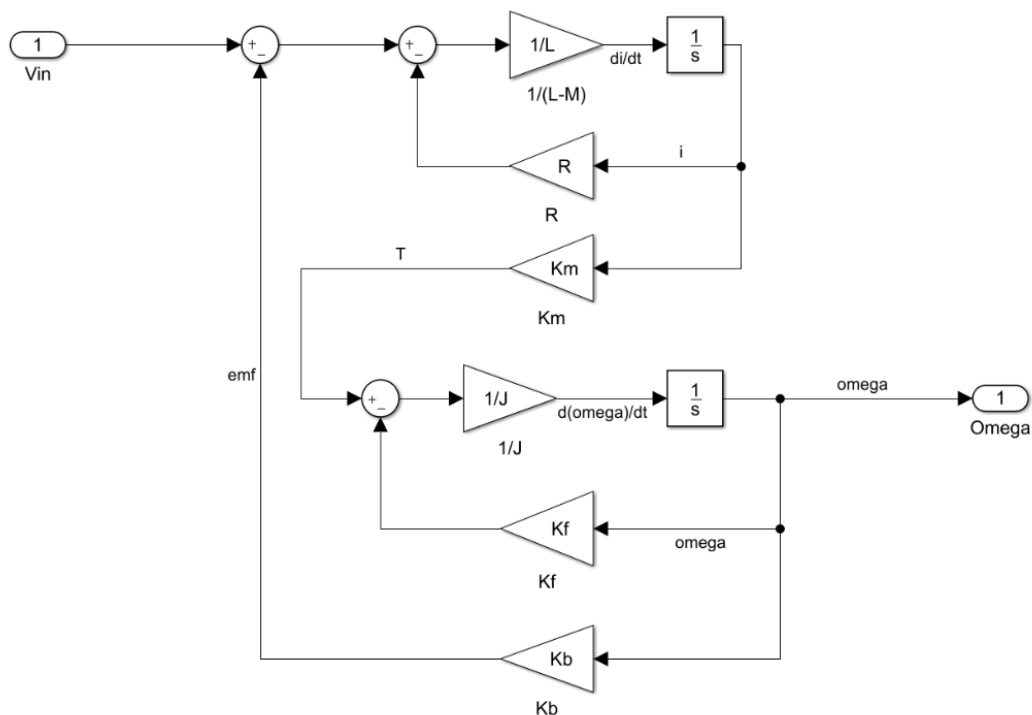
برای انجام پژوهش از matlab R2018b در سیستمی با پرسسور Intel (R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz با رم 16 GB استفاده می کنیم. در برنامه متلب فرمولهای الگوریتم چرخه آب و فرآیند کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی بوسیله کد های m.file کد نویسی و شبیه سازی می شوند و با توجه به تابع تبدیل بدست آمده از فرمول ها و فضای حالت موتور بدون جاروبک ضرایب k_p و k_i و k_d بدست می آیند. جهت اجرای شبیه سازی ها و بدست آوردن نتایج، موتوری با پارامترهای جدول ۱ در نظر گرفته می شود و تابع تبدیل موتور بدست آورده می شود.

جدول ۱: مشخصات موتور بدون جاروبک

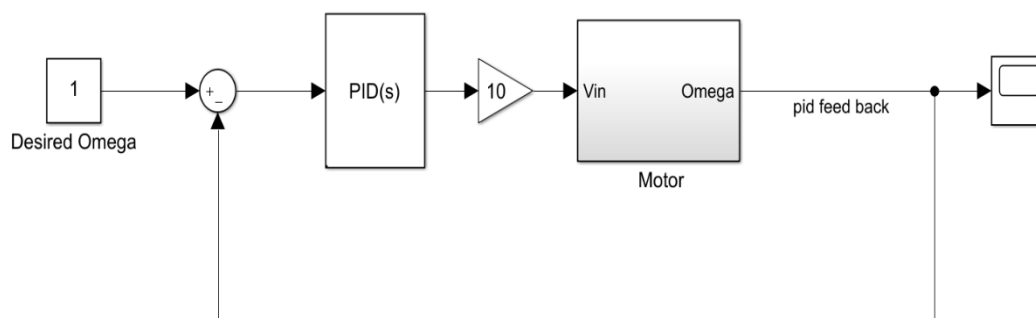
پارامترها	مقادیر و واحدها
R	21.2Ω
K_b	$0.1433 V_s/rad$
K_f	$1 \times 10^{-4} kg.m.s/rad$
L	$0.052 H$
K_m	$0.1433 kg.m/A$
J	$1 \times 10^{-5} kg.m.s^2/rad$
ω	$3000 rad/s$ $200 rad/s$

برای شبیه سازی موتور بدون جاروبک در محیط سیمولینک متلب با استفاده از فرمول ۲۳ و ۲۴ و ۲۰ و ۲۱ کار شبیه سازی انجام می گیرد. فرمول ۲۳ رابطه الکتریکی موتور بدون جاروبک را نشان می دهد و فرمول ۲۴ رابطه مکانیکی موتور بدون جاروبک را نشان می دهد. فرمولهای ۲۰ و ۲۱ رابطه کوپلاژ الکترومکانیکی موتور بدون جاروبک است. شکل ۱ و ۲ شبیه سازی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کنترل سرعت موتور بدون جاروبک در محیط سیمولینک است. تابع انتقال موتور بدون جاروبک با توجه به فرمول ۲۷ و جدول ۱ به شکل زیر بدست می آید.

$$G(s) = \frac{275577.36}{s^2 + 417.7s + 4356.5} \quad (28)$$



شکل ۱: شبیه سازی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کنترل سرعت موتور بدون جاروبک(شبیه سازی موتور بدون جاروبک)



شکل ۲: شبیه سازی کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی کنترل سرعت موتور بدون جاروبک (شبیه سازی کنترل کننده موتور بدون جاروبک)

در ادامه با بدست آوردن تابع تبدیل G موتور بدون جاروبک و قرار دادن آن در الگوریتم چرخه آب و بدست آوردن ضرایب k_p و k_i و k_d و قرار دادن ضرایب در کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی در محیط سیمولینک رفتار موتور بدون جاروبک را مورد بررسی قرار می دهیم.

در این مقاله برای بدست آوردن ضرایب k_p و k_i و k_d کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی علاوه بر الگوریتم چرخه آب از الگوریتم های الگوریتم ژنتیک GA و الگوریتم ازدحام زرات PSO ، رقابت استعماری ICE و تکامل تفاضلی DE نیز بهره برداری می شود. در هر الگوریتم تعداد تکرار ها و نمونه گیری از تابع هدف برابر ۱۰۰۰ قرار می گیرد و تعداد جمعیت اولیه را حداقل برابر ۵۰ قرار می گیرد.

۴- نتایج شبیه سازی

با اجرای الگوریتم های چرخه آب و ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی نتایج در جدول ۲ یادداشت می شود. همچنین نتایج حاصل از [6] و [9] و [10] و [11] را در جدول قرار می گیرد تا مقایسه بهتر بین روش پیشنهادی و روشهای دیگر صورت پذیرد.

پاسخ پله الگوریتم های بهینه سازی در شکل ۳ به نمایش در آمده است و شکل ۴ نمودار همگرایی به جواب توابع که توسط الگوریتم ها به اجرا در آمده است را نشان می دهد. شکل ۵ و ۶ به ترتیب سرعت همگرایی به جواب الگوریتم تکامل تفاضلی، الگوریتم های چرخه آب، ازدحام ذرات، ژنتیک و رقابت استعماری است.

شکل ۷ شبیه سازی موتور بدون جاروبک در محیط سیمولینک متلب است که ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی بدست آمده از جدول ۲ در محیط سیمولینک متلب بر روی بلوک کنترل کننده تناسبی انتگرالی مشتقی شکل ۲ برای دور موتور ۳۰۰۰ دور و ۲۰۰ دور اعمال گردیده است و پس از اجرا توسط اسکوپ موجود در سیمولینک پاسخ موتور حاصل از ضرایب هر الگوریتم به طور جداگانه به نمایش در آمده است و در نمودار آخر به صورت مقایسه بین الگوریتم ها به نمایش در آمده است. شکل ۸ مقایسه الگوریتم ها توسط اسکوپ محیط سیمولینک متلب است تا وضعیت عملکرد هر الگوریتم به نمایش گذاشته شود.

همانطور که در شکل ۳ و جدول ۲ مشاهده می گردد پایداری جواب الگوریتم چرخه آب و ازدحام ذرات برابر ۰.۰۱۰۳۸ بهتر از جواب الگوریتم های دیگر و دیگر پژوهشها است.

این دو الگوریتم که از نظر جواب یکسان هستند و مقایسه درست بین این دو الگوریتم در سرعت همگرایی به جواب است. الگوریتم چرخه آب و ازدحام ذرات از نظر همگرا شدن به جواب بهینه بهتر از الگوریتم ژنتیک هستند زیرا این دو الگوریتم از نظر معیار پایداری برابر ۰.۰۲۵۳، زمان نشست نمودار برابر ۰.۰۱۴۹۱، زمان صعود برابر ۰.۰۰۹۶۱۹، زمان اوج نمودار برابر ۰.۰۱۸۱۷ و بهترین جواب برابر ۰.۰۲۸۴۴ از الگوریتم ژنتیک بهتر بوده اند و همین گونه می توان بیان کرد که الگوریتم ژنتیک به مراتب بهتر از الگوریتم رقابت استعماری عمل کرده است.

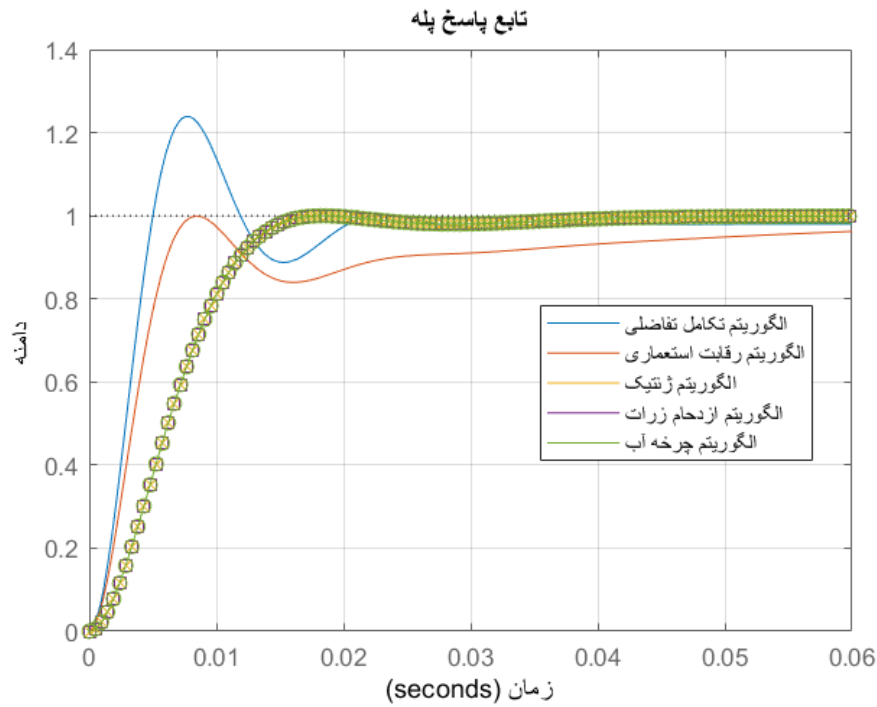
همانگونه که از شکل ۴ و ۵ می توان دید الگوریتم تکامل تفاضلی به دلیل اینکه از نظر اکتشاف در این مسئله بسیار ضعیف است لذا همگرایی به جواب، خوبی نیز ندارد. الگوریتم تکامل تفاضلی جواب ناپایدار برای این مسئله دارد که در شکل ۷ و ۸ نیز قابل مشاهده است پس می توان گفت الگوریتم تکامل تفاضلی برای حل این مسئله نامناسب است.

از جدول ۲ می توان دریافت که الگوریتم چرخه آب از نظر زمان اجرا بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات عمل کرده است اما تکیه به زمان اجرا به دلیل اینکه وضعیت سیستم مورد اجرا متغیر است، قابل استناد جهت انجام مقایسه بین الگوریتم ها نیست. لذا جهت مقایسه بهتر، سرعت همگرایی به جواب را ملاک مقایسه قرار می دهیم.

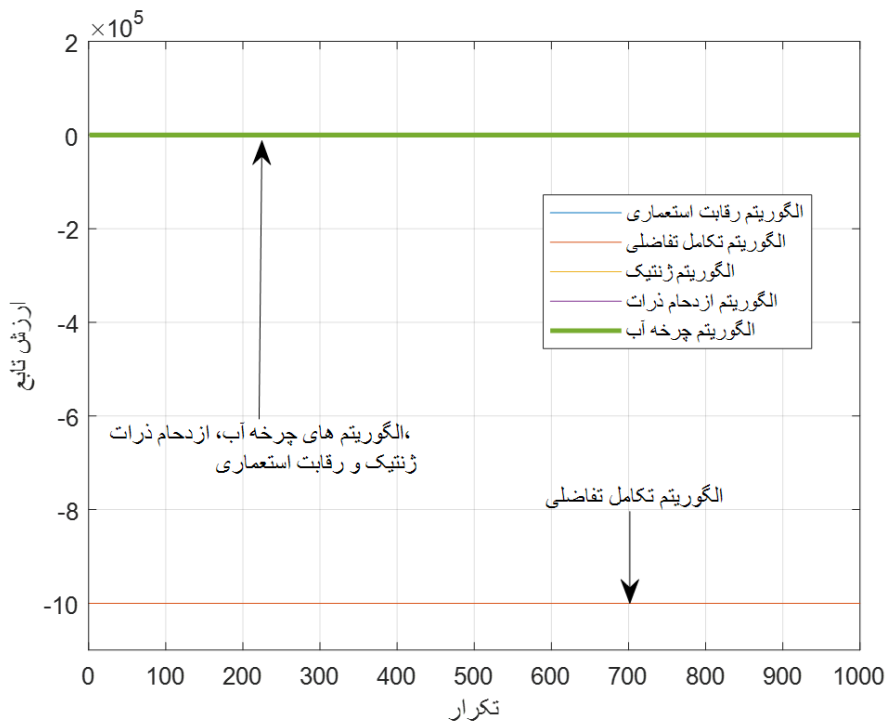
جدول ۲: نتایج اجرای الگوریتم ها و تعدادی از پژوهش های پیشین

بهترین جواب	الگوریتم چرخه آب	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم تکامل تفاضلی	الگوریتم رقابت استعماری	کنترل کننده PID محدب		کنترل کننده BF- PID با استفاده از عملکرد مبتنی بر تناسب اندام ITSE	کنترل سرعت موتور DC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم Bat	کنترل سرعت مبتنی بر PD فازی برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک
						86.72	0.2146			
ضریب تناسبی	0.0018889 4	0.0018889 4	0.0018783 7	0.0774978 46	0.00229115	86.72	0.2146	0.54936	0.935863	تعریف نشده است
ضریب انتگرالی	0.2259937	0.2259937	0.2254025 6	-6.1734E-05	0.26684302	0.307	0	0.9833	0.491688	تعریف نشده است
ضریب مشتقی	0	0	0	0.0707752 3	0.00111942	0.1742	0.0077	0.0769	1.065582	تعریف نشده است
بهترین جواب	0.0253007 8	0.0253007 8	0.0253402 7	-999976.13	0.13276039	تعریف نشده است		تعریف نشده است	0.317517	0.1103
زمان صعود نمودار	0.0096195 6	0.0096195 6	0.0096557 1	0.0033437 93	0.00644794	0.2426		0.003	0.020667	0.0137
زمان نشست نمودار	0.0149164 5	0.0149164 5	0.0149856 1	0.0829280 16	0.0379467	0.397		0.053	0.03688	0.0205
کمترین مقدار نشست نمودار	0.9059023 3	0.9059023 3	0.9028037 5	0.8861586 76	0.9135043	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
بیشترین مقدار نشست نمودار	1	1	1	1.2378709 76	1	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
مقدار بالا زدگی نمودار	0	0	0	23.787097 63	0	0.397		0	0.083329	0
مقدار پایین زدگی نمودار	0	0	0	0	0	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
مقدار اوج نمودار	1	1	1	1.2378709 76	1	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
زمان اوج نمودار	0.0181722 1	0.0181722 1	0.0185971 4	0.0075383 37	0.01135291	تعریف نشده است		0.0769	تعریف نشده است	تعریف نشده است
زمان اجرای الگوریتم	644.49934 1	723.32411 2	1244.7621 3	764.30080 76	774.290768	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
معیار پایداری	0.0103843 3	0.0103843 3	0.0103546 6	-1000000	0.0948137	تعریف نشده است		0.0561	0.805063	0.0535
بهترین جواب به غیر از معیار پایداری	0.0149164 5	0.0149164 5	0.0149856 1	23.870025 64	0.0379467	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
میانگین انحراف	0.0012577 3	0	0.0346277 6	3351143.5 5	0.08061489	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است
انحراف معیار	0.0019886 4	0	0.0549369 3	17023740. 38	0.21533953	تعریف نشده است		تعریف نشده است	تعریف نشده است	تعریف نشده است

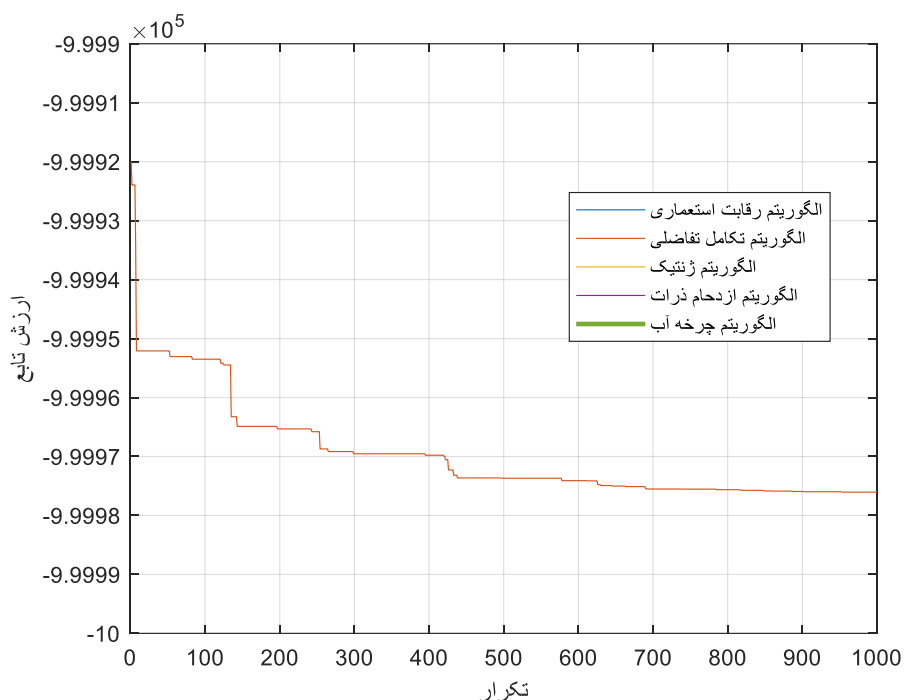
بهینه سازی ظرایب کنترل کننده تناسبی انگرالی مشتقی دور موتور بدون جاروبک با الگوریتم بهینه سازی چرخه آب



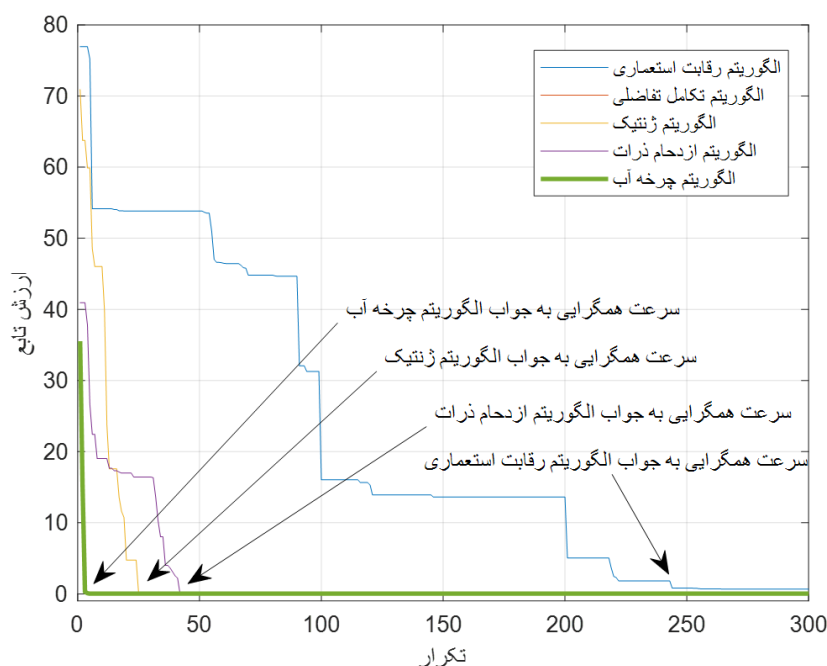
شکل ۳: پاسخ پله تابع موتور بدون جاروبک با الگوریتم های چرخه آب، ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی



شکل ۴: نمودار همگرایی به جواب الگوریتم های چرخه آب، ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی



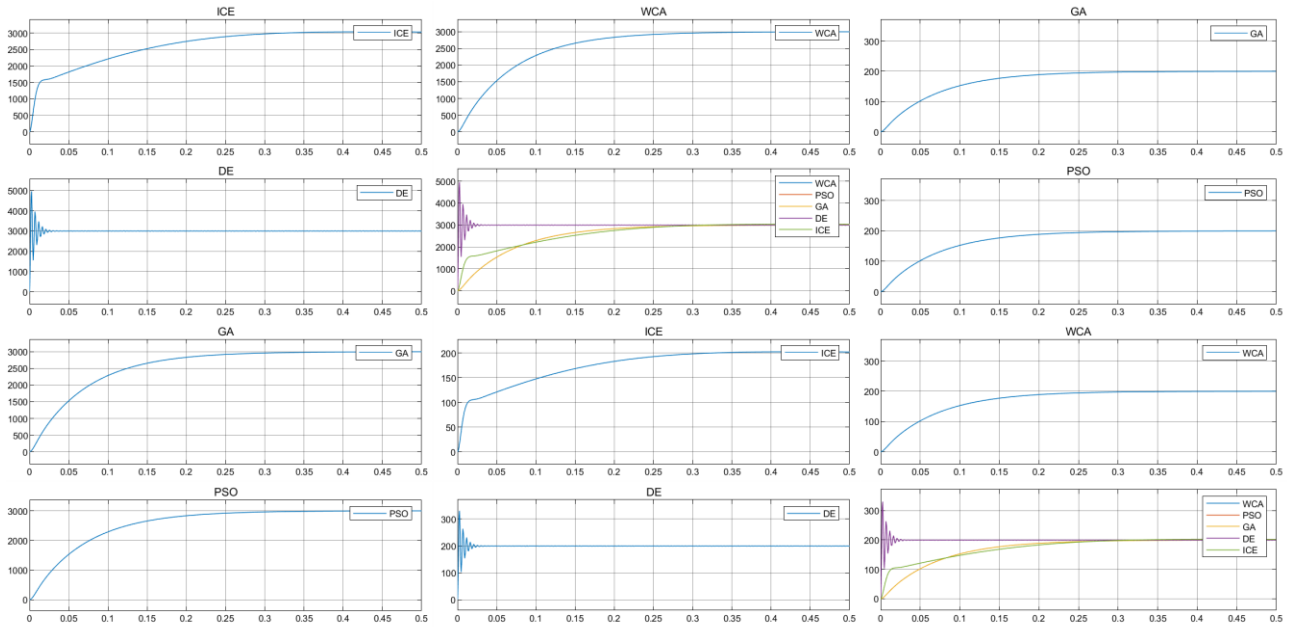
شکل ۵: نمودار سرعت همگرایی به جواب الگوریتم تکامل تفاضلی



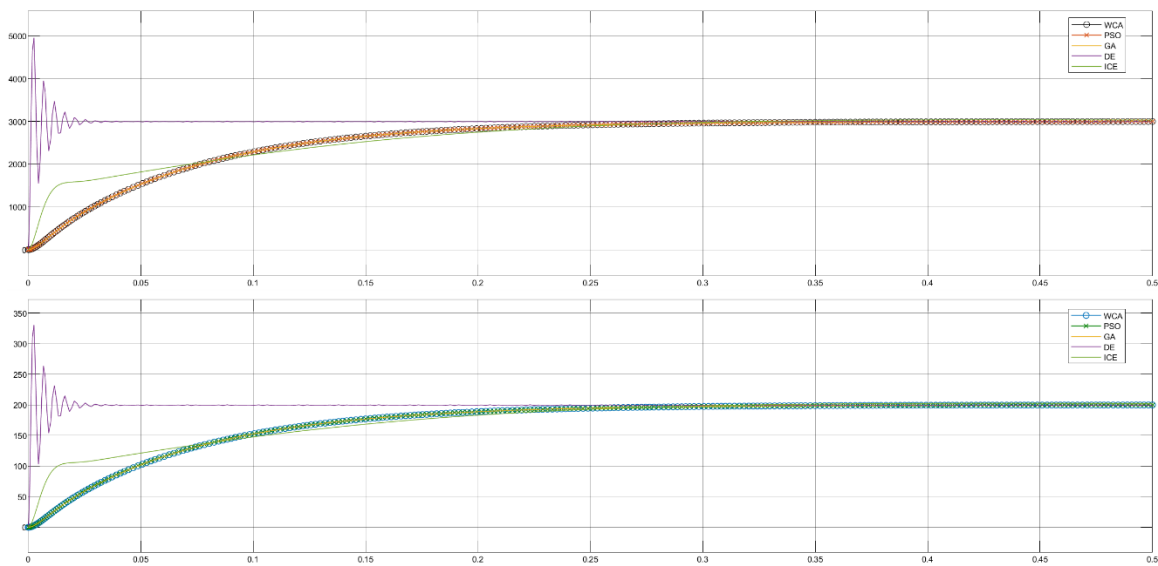
شکل ۶: نمودار سرعت همگرایی به جواب الگوریتم های چرخه آب، ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی

بنابراین با توجه به شکل ۶ می توان نتیجه گرفت که الگوریتم چرخه آب سرعت همگرایی به جواب بالاتری نسبت سایر الگوریتم ها برخوردار است. هم نقطه شروع بهینه سازی کمتر نسبت به سایر الگوریتم ها (کمتر از ۴۰) دارد و هم در کمترین تکرار (کمتر از ۱۰ تکرار) به جواب نزدیک شده است. نقطه شروع بهینه سازی الگوریتم ازدحام ذرات بین ۴۰ تا ۵۰ است و سرعت همگرایی بین ۳۰ تا ۵۰ تکرار دارد. نقطه شروع بهینه سازی الگوریتم ژنتیک بین ۷۰ تا ۸۰ است و سرعت همگرایی بین ۲۰ تا ۳۰ تکرار دارد. نقطه شروع بهینه سازی الگوریتم رقابت استعماری بین ۷۰ تا ۸۰ است و از الگوریتم ژنتیک بیشتر است و سرعت همگرایی بیشتر از ۲۵۰ تکرار دارد. در

کل الگوریتم چرخه آب هم از نظر نقطه شروع بهینه سازی و هم از نظر سرعت همگرایی بهتر از دیگر الگوریتم ها می باشد. شکل ۷ نیز تایید کننده نتایج حاصل از الگوریتم ها در جدول ۲ است.



شکل ۷: عملکرد کنترل سرعت موتور بدون جاروبک با الگوریتم های چرخه آب، ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی با دور ۲۰۰ و ۳۰۰۰



شکل ۸: مقایسه عملکرد الگوریتم ها در کنترل سرعت موتور بدون جاروبک با دور ۲۰۰ و ۳۰۰۰

۵- نتیجه گیری

با توجه به بهترین جوابها که در جدول ۲ آمده است الگوریتم چرخه آب و ازدحام ذرات بهترین جواب را از نظر معیار پایداری و مقدار بالا زدگی نمودار و زمان نشست نمودار وغیره به دست آورده اند و روش پیشنهادی الگوریتم چرخه آب مطابق شکل ۶ از سرعت همگرایی بالاتری در رسیدن به بهترین جواب، نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و سایر الگوریتم ها برخوردار است. لذا می توان گفت الگوریتم چرخه آب هم از نظر زمان و هم از نظر سرعت همگرایی در رسیدن به بهترین جواب، بهتر از سایر الگوریتم ها است و همچنین روش پیشنهادی از نظر پایداری بهتر از روشهای ارائه شده دیگر می باشد.

مراجع

- [1] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, and M. Hamdi, "Water cycle algorithm - A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems," *Comput. Struct*, vol. 110–111, pp. 151–166, 2012.
- [2] A. Sadollah, H. Eskandar, H. M. Lee, D. G. Yoo, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm: A detailed standard code," *SoftwareX*, vol. 5, pp. 37–43, 2015.
- [3] A. Sadollah, H. Eskandar, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm for solving constrained multi-objective optimization problems," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 27, pp. 279–298, 2015.
- [4] A. Sadollah, H. Eskandar, A. Bahreininejad, and J. H. Kim, "Water cycle algorithm with evaporation rate for solving constrained and unconstrained optimization problems," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 30, no. 6, pp. 58–71, 2015.
- [5] D. Potnuru, K. Alice Mary, and C. Sai Babu, "Experimental implementation of Flower Pollination Algorithm for speed controller of a BLDC motor," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 2, pp. 287–295, 2019.
- [6] K. Premkumar and B. V. Manikandan, "Speed control of Brushless DC motor using bat algorithm optimized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 32, pp. 403–419, 2015.
- [7] B. N. Kommula and V. R. Kota, "Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly Algorithm based fractional order PID controller," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 22, no. 18, pp. 6135–6146, 2018.
- [8] H. E. A. Ibrahim, F. N. Hassan, and A. O. Shomer, "Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 5, no. 2, pp. 391–398, 2014.
- [9] K. Premkumar and B. V. Manikandan, "Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 818–840, 2016.
- [10] S. Srikanth and G. Raghu Chandra, "Modeling and PID control of the brushless DC motor with the help of Genetic Algorithm," *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM.*, pp. 639–644, 2012.
- [11] M. K. Merugumalla and P. K. Navuri, "PSO and firefly algorithms based control of BLDC motor drive," in *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 994–999.
- [12] I. Anshory, I. Robandi, and Wirawan, "Monitoring and optimization of speed settings for Brushless Direct Current (BLDC) using Particle Swarm Optimization (PSO)," in *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, 2016, pp. 243–248.
- [13] F. Aymen, O. Berkati, S. Lassaad, and M. N. Srifi, "BLDC Control Method Optimized by PSO Algorithm," in *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies, ISAECT*, 2019, pp. 1–5.
- [14] S. B. Murali and P. M. Rao, "Adaptive sliding mode control of BLDC motor using cuckoo search algorithm," in *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, 2018, pp. 989–993.
- [15] K. S. Rama Rao and A. H. Bin Othman, "Design optimization of a BLDC motor by Genetic Algorithm and Simulated Annealing," in *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, 2007, pp. 854–858.
- [16] O. Gulbas, Y. Hames, and M. Furat, "Comparison of PI and Super-twisting Controller Optimized with SCA and PSO for Speed Control of BLDC Motor," in *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 2020, pp. 1–7.
- [17] C. Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULIN*, Illustrate, no. October. Prentice Hall PTR, 1998.

Optimization of Proportional Integral Derivative controller Coefficients of Control Brushless Motor Speed with Water Cycle Optimization Algorithm

Khodadadi, Habiballah¹, Esmael beag, Mostafa^{2*}, Cheraghi Shirazi, Najmeh³

1: Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bushehr, Iran, habiballah.khodadadi@yahoo.com

2*: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bushehr, Iran, me_beag@yahoo.com

3: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bushehr, Iran, nch_shirazi@yahoo.com

ABSTRACT:

Brushless motors are widely used in industrial, domestic and electronic equipment today due to their high reliability, high efficiency, low maintenance and many other advantages. But they also have disadvantages, including electronic commutation, and this requires a speed controller (speed) for this type of engine. In recent decades, a large number of speed controllers have been designed to control the speed of brushless motors. Typically, a derivative-integral-proportional controller is the optimal choice for controlling the speed of brushless motors. By designing the parameters of the derivative-integral-proportional control system, the speed of the brushless motors can be controlled. Obtaining Derivative, Integral and Proportional Parameters The proportional integral derivative controller has always been one of the control engineering problems. There are many ways to obtain the optimal derivative-integral-proportional control parameters. One of the methods that has been widely used to obtain and design derivative-integral-proportional control parameters are optimization algorithms. Water cycle optimization algorithm is an optimization algorithm that is used to optimize derivative-integral-proportional control parameters. In this paper, using the water cycle algorithm, the derivative coefficient equal to 0, the integral coefficient equal to 0.2259937 and the proportional coefficient equal to 0.00188894 are obtained which gives the stability index equal to 0.01038433, the rise time equal to 0.00962, settling time equal to 0.01492, peak time equal to 0.01817, settling min equal to 0.9059. These results are compared with the results obtained from particle swarm algorithms, genetics, etc., and show that the water cycle method is better.

KEYWORDS: Water Cycle Algorithm, Derivative Integral Proportional Controller, Brushless Motor, Speed Control