

طراحی و پیاده‌سازی یک کنترل کننده بهینه‌شده به روش TLBO بر روی سامانه روتور دوقلو

مصطفی یزدانی و خسرو خاندانی

سامانه‌های هوایی عمودپرواز مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل این سامانه با هدف متعادل نگه‌داشتن محور در حضور اغتشاشات و نیروهای خارجی که تعادل محور را به هم می‌زنند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در زمینه مدل‌سازی و کنترل سامانه روتور دوقلو، پژوهش‌های متنوعی انجام شده است [۱] تا [۴]. در [۵] یک مدل دینامیکی برای روتور دوقلوی چندرودی- چندخروجی با استفاده از روش اوپلر- لاگرانژ توسعه داده شده است. در [۶] یک کنترل کننده وقفی برای مدل غیرخطی سامانه روتور دوقلوی چندرودی- چندخروجی با استفاده از شبکه‌های عصبی RBF جهت مقابله با اثرات باد طراحی شده که عملکرد مناسبی را در برابر اغتشاشات خارجی از خود نشان می‌دهد. در [۷] کنترل روتور اصلی در سامانه چندرودی- چندخروجی روتور دوقلو با استفاده از یک رویکرد کنترل وقفی مدل مرجع انجام شده است. در [۸] یک کنترل کننده مبتنی بر روتور حالت غیرخطی برای سامانه کنترل روتور دوقلو با اشباع محرک انجام شده است. در این مقاله برای مقابله با اغتشاشات خارجی و اصطکاک بر روی شفت روتور از یک روتور اصطکاک و اغتشاش غیرخطی استفاده شده است. در [۹] به مسئله مدل‌سازی سامانه روتور دوقلو پرداخته شده و ناحیه عملکرد خطی آن مشخص گردیده و نهایتاً مبتنی بر دیتای تجربی، یک مدل خطی غیرمینیم فاز برای توصیف دینامیک این سامانه استخراج شده است. کنترل مود لغزشی به دلیل قابلیت مقابله با عدم قطعیت‌ها در مقالات مختلفی بر روی سامانه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰] تا [۱۴]. در [۱۵] یک استراتژی کنترل مود لغزشی برای پایدارسازی تصادفی سامانه‌های مراتب بالا ارائه شده است. همچنین در این مقاله یک مدل تصادفی برای روتور دوقلوی یک درجه آزادی، استخراج و روش کنترل پیشنهادی بر روی آن اعمال شده است. در [۱۶] یک کنترل کننده مود لغزشی غیرمتمرکز بر روی سامانه روتور دوقلو اعمال گردیده و برای کنترل موقعیت‌های عمودی و افقی، سامانه روتور دوقلو به دو زیرسامانه عمودی و افقی دکوپله شده است. این دکوپله‌کردن مدل سامانه روتور دوقلو موجب کاهش دقت مدل شده است؛ چرا که روتور دوقلوی دو درجه آزادی یک سامانه به شدت کوپل شده است. در [۱۷] به مسئله پایدارسازی سامانه روتور دوقلوی چندرودی- چندخروجی در حضور غیرخطی‌گی در محرک پرداخته شده است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا یک روش جداسازی کلی برای از بین بردن اثر متقابل بین ورودی و خروجی روتورهای اصلی و فرعی پیشنهاد شده است.

الگوریتم‌های هوشمند و فراابتکاری برای تنظیم کنترل کننده‌های کلاسیک از جمله PID به وفور در مقالات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۸] تا [۲۰]. بسیاری از این روش‌ها مبتنی بر جمعیت هستند که در روش‌های مبتنی بر جمعیت باید جمعیت اولیه و تعداد تکرار مشخص

چکیده: در این مقاله، نحوه طراحی و پیاده‌سازی یک کنترل کننده PID جهت پایدارسازی یک سامانه روتور دوقلوی یک درجه آزادی ارائه می‌گردد. با بهره‌گیری از الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO)، ضرایب کنترل کننده PID به صورت بهینه تنظیم می‌شوند و سپس این کنترل کننده بر روی سامانه روتور دوقلویی که در آزمایشگاه کنترل دانشگاه اراک ساخته شده است، پیاده‌سازی می‌گردد. هدف از کنترل سامانه روتور دوقلو، پایدارسازی سامانه در حالت صفر درجه افقی است. مدل‌سازی سامانه غیرخطی روتور دوقلو در فضای حالت انجام می‌شود و از مدل به دست آمده جهت تنظیم بهینه ضرایب کنترل کننده PID با روش آموزش و یادگیری استفاده می‌شود. نتایج به دست آمده با روش آموزش و یادگیری با چند روش فراابتکاری دیگر شامل الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم تکامل تفاضلی مقایسه می‌گردد. با استفاده از همه روش‌ها، سامانه با اندکی خطا به پایداری قابل قبولی رسیده است. با وجود این با بهینه‌سازی توسط الگوریتم آموزش و یادگیری، پایدارسازی و عملکرد سریع‌تر سامانه کنترل در مقایسه با روش‌های فراابتکاری دیگر قابل مشاهده است. مزیت عمده استفاده از روش آموزش و یادگیری، عدم وجود پارامترهای کنترلی است که استفاده از آن را راحت می‌کند. نتایج پیاده‌سازی آزمایشگاهی نیز اثربخشی و کارایی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را تأیید می‌کنند.

کلیدواژه: الگوریتم آموزش و یادگیری، PID، روتور دوقلو.

۱- مقدمه

در سال‌های گذشته، توسعه الگوریتم‌های کنترل برای پهنای‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. برای تدوین استراتژی‌های کنترل جدید، نیاز به استفاده از آزمایشگاه‌ها و نرم‌افزارهای به خصوص وجود دارد؛ به طوری که بتوان عملکرد پهنای‌ها را تحلیل و بررسی کرد. برای این منظور آزمایشگاه‌هایی به طور خاص برای آموزش و پژوهش در زمینه دینامیک پرواز و کنترل طراحی شده که یکی از این بسترها، هلیکوپتر آزمایشگاهی با نام روتور دوقلو است که سامانه‌ای غیرخطی و چندمتغیره است که مدل‌سازی آن و طراحی کنترل کننده برای آن به عنوان یکی از مسائل چالش برانگیز تلقی می‌شود. روتور دوقلوی یک درجه آزادی، حالت خاصی از سامانه مذکور است که در آن هدف کنترلی، صفر کردن زاویه محور متصل کننده روتورهاست. چنین ساختاری در این مقاله در تاریخ ۶ تیر ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۲۳ آبان ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

مصطفی یزدانی، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، (email: yzdany141@gmail.com).
خسرو خاندانی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، (email: k-khandani@araku.ac.ir).

راحت‌تر و نتیجه به‌دست‌آمده از آن همواره یکسان و قابل اعتماد است. این در حالی است که استفاده از روش‌های دیگر نظیر الگوریتم ژنتیک مستلزم مقداردهی به پارامترهای کنترلی است و در صورت تعیین مقادیر مختلف برای این پارامترها، نتایج حاصل متفاوت خواهد بود. در واقع پارامترهای کنترلی باید جداگانه به‌صورت بهینه تنظیم شوند تا الگوریتم کارایی مناسبی داشته باشد. این مشکل در مورد TLBO وجود ندارد.

سامانه روتور دوقلو به‌عنوان شبیه‌ساز سیستم پایداری پرنده‌های عمودپرواز در آزمایشگاه کنترل دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اراک توسط نویسندگان مقاله ساخته شده است. جهت تنظیم بهینه ضرایب کنترل‌کننده، مدل‌سازی این روتور دوقلو به‌خصوص با توجه به معادلات فیزیکی حاکم بر سیستم و نیز بررسی ارتباط بین ولتاژ و نیروی موتور انجام شده است. با استفاده از مدل غیرخطی به‌دست‌آمده، تنظیم ضرایب PID توسط الگوریتم TLBO انجام شده است. علاوه بر این، جهت مقایسه عملکرد این الگوریتم با الگوریتم‌های دیگر، روش‌های الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم تکامل تفاضلی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج بهینه‌سازی تابع هزینه با استفاده از هر یک از این روش‌های هوشمند با نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم TLBO مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند عملکرد TLBO هم از جهت سادگی کاربرد و هم از جهت بهینگی پاسخ‌ها در مقایسه با سایر الگوریتم‌های استفاده‌شده برتر است. این موضوع به‌خصوص از جهت آنکه این الگوریتم نیازی به تنظیم پارامترهای کنترلی ندارد و بدون تنظیمات به‌خصوصی می‌تواند پاسخ‌های مناسب تولید کند حائز اهمیت است. همچنین با پیاده‌سازی آزمایشگاهی، نتایج آزمایشگاهی نیز عملکرد موفق این الگوریتم را نشان می‌دهند.

در ادامه و در بخش ۲ مقدمات لازم در مورد الگوریتم‌های هوشمند ذکر شده ارائه می‌گردد. سپس در بخش ۳ نحوه مدل‌سازی روتور دوقلو، تشریح و مدل غیرخطی استخراج می‌گردد. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی، در بخش ۵ نتایج پیاده‌سازی آزمایشگاهی و در بخش ۶ نتیجه‌گیری مقاله ارائه می‌شود.

۲- مرور الگوریتم TLBO

به طور کلی، هدف از الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌سازی یافتن یک جواب قابل قبول با توجه به محدودیت و نیاز مسئله است. در تعیین جواب یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی برای آن وجود داشته باشد. برای مقایسه جواب‌های یک مسئله و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف یا هزینه تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به ماهیت مسئله وابسته است و انتخاب تابع هدف مناسب، یکی از مهم‌ترین مراحل در الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. هر مسئله بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آنها را متغیرهای طراحی می‌نامند. هدف از بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است؛ به‌گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود. در این پژوهش، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌صورت آفلاین ضرایب کنترل‌کننده PID را بهینه می‌نمایند. تابع هزینه به‌کارگرفته‌شده ITAE است که همان انتگرال قدرمطلق خطا ضربدر زمان است. عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده‌شده بر همین مبنا مقایسه می‌شوند و تابع هزینه کمتر مؤید عملکرد بهتر الگوریتم است. حال در اینجا به مرور روش TLBO که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است می‌پردازیم.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)، یکی از الگوریتم‌های هوشمند تکاملی (هوش ازدحامی) است که در سال ۲۰۱۱ با الهام از فرایند یادگیری و آموزش توسط آقای راو پیشنهاد شد [۲۵]. از

شوند. تنظیم ضرایب PID برای پایداری سامانه روتور دوقلو نیز توسط الگوریتم‌های هوشمند انجام شده است. از جمله در [۲۱] یک کنترل‌کننده تنظیم‌شده توسط الگوریتم ژنتیک برای سامانه روتور دوقلو ارائه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد موفق این الگوریتم را در پایداری سامانه در حضور غیرخطی‌گی‌های سامانه و اثرات متقابل روتورها بر روی یکدیگر نشان می‌دهد. با به‌کارگیری این روش، پاسخ‌ها به‌سرعت به مقادیر بهینه همگرا می‌شوند. در [۲۲] یک کنترل‌کننده تنظیم‌شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با محدوده جستجوی از پیش تعیین‌شده برای سامانه روتور دوقلو پیشنهاد شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش هوشمند مبتنی بر جمعیت اولیه است که به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. این روش بهینه‌سازی بر اساس اصول تکامل طبیعی عمل می‌کند و علاوه بر تعداد جمعیت اولیه و تعداد تکرار، دارای پارامترهای کنترلی از جمله نرخ جهش و نرخ انتخاب است که انتخاب مناسب این پارامترها جهت دستیابی به عملکرد بهینه ضروری است. در [۲۳] یک کنترل‌کننده PID تنظیم‌شده با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO) برای سامانه روتور دوقلو دو درجه آزادی ارائه شده است. PSO نیز بر اساس جمعیت اولیه تصادفی عمل می‌کند و دارای پارامترهای کنترلی وزن و ضرایب یادگیری است. در [۲۴] یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی-دو مشتقگیر (PID2) برای سامانه روتور دوقلو ارائه گردیده که در آن جهت تنظیم کنترل‌کننده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) استفاده شده است. الگوریتم گرگ خاکستری نیز یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است. با وجود عملکرد بهتر این الگوریتم در مقایسه با روش‌های قدیمی‌تر مانند الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ذرات، این الگوریتم نیز دارای پارامترهای کنترلی می‌باشد که عملکرد مناسب الگوریتم وابسته به تنظیم مناسب آنهاست.

از جمله روش‌های فراابتکاری نوین که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) می‌باشد که در [۲۵] ارائه شده است. این الگوریتم برگرفته از جریان آموزش و یادگیری است و یک الگوریتم مبتنی بر جمعیت است که از جمعیتی از پاسخ‌ها برای رسیدن به پاسخ بهینه استفاده می‌کند. در TLBO جمعیت اولیه گروهی از دانش‌آموزان فرض می‌شود که قصد داریم نمرات آنان بهبود یابد و منظور از نمرات به‌دست‌آمده، مقدار تابع هزینه‌ای است که باید کمینه شود. TLBO کاربردهای گوناگونی در بهینه‌سازی و کنترل در علوم مختلف پیدا کرده است [۲۶] و [۲۷]. از جمله در [۲۸] یک کنترل‌کننده PID بهینه‌سازی‌شده توسط روش TLBO برای کنترل یک کوادکوپتر ارائه شده است. در [۲۹] از روش TLBO جهت بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID مبتنی بر کنترل مود لغزشی استفاده شده است. با مرور روش‌های بهینه‌سازی مورد اشاره جهت تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های کلاسیک می‌توان این روش‌ها را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد: الف) روش‌های دارای پارامترهای کنترلی مانند الگوریتم ژنتیک، PSO، GWO و غیره. با تنظیم پارامترهای کنترلی این روش‌ها می‌توان به پاسخ‌های مختلفی دست یافت. با این حال، تنظیم پارامترها به نحو بهینه، خود مسئله چالش‌برانگیزی است که مقالات متعدد به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. ب) روش‌های بدون پارامتر کنترلی که بسیار معدود هستند و کاراترین روش از این دسته همان روش TLBO است. دیگر روش بدون پارامتر معرفی‌شده در مقالات، روش بهینه‌سازی اجتماعی (SOA) است [۳۰]. در روش TLBO فقط جمعیت اولیه و تعداد تکرار مشخص می‌شود و پارامتر دیگری جهت تنظیم بهینه وجود ندارد. تفاوت عملکرد TLBO با سایر روش‌ها در آن است که این الگوریتم پارامترهایی جهت تنظیم اولیه ندارد و از این جهت استفاده از آن بسیار

خودش برساند. میانگین نمرات به‌دست‌آمده در هر کلاس می‌تواند به‌عنوان معیاری جهت سنجش عملکرد معلم قلمداد شود. اما در واقعیت این امر امکان‌پذیر نیست که همه دانش‌آموزان به سطح معلم برسند؛ بلکه نهایتاً به سطح میانگین جدید M_2 خواهند رسید. در اینجا به یک جامعه آماری دیگر خواهیم رسید که دارای میانگین M_2 است و معلم جدید، همان بهترین فرد در جمعیت آماری جدید یا T_2 انتخاب خواهد شد. در این مرحله معلم جدید یا همان T_2 سعی خواهد کرد که میانگین سطح کلاس را به سطح خودش برساند و این روال بدین صورت ادامه خواهد یافت تا سطح دانش جمعیت بهتر شود. این فاز از الگوریتم به‌عنوان فاز معلم شناخته می‌شود.

رابطه به‌روزرسانی اعضای جمعیت انتخاب‌شده در فاز معلم به‌صورت زیر است

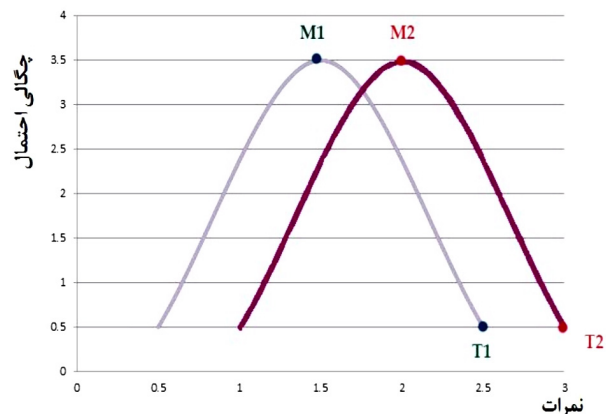
$$X_{new} = X_{old} + r(X_{teacher} - T_f \text{mean}) \quad (1)$$

که در آن $X_{teacher}$ میانگین مطلوب یا بهترین عضو کلاس و $Mean$ میانگین اعضای جمعیت در دور فعلی است. r یک بردار تصادفی بین صفر و یک بوده که میزان موفقیت یک دانش‌آموز در درک مطالب یاد داده شده توسط استاد یا معلم را نشان می‌دهد. بدین صورت که اگر r صفر باشد یعنی دانش‌آموز از مطالبی که معلم به او آموزش داده چیزی یاد نگرفته و اگر r برابر یک باشد یعنی تمام مطالب معلم را فراگرفته است. البته مقدار r بین صفر و یک است و بسته به مقدار آن، یادگیری می‌تواند متفاوت باشد. برای درک بهتر، r را می‌توان ضریب هوشی دانش‌آموز نیز در نظر گرفت. همچنین T_f یا ضریب آموزش، همان قدرت انتقال مطالب توسط معلم است که می‌تواند عدد ۱ یا ۲ باشد. اگر T_f معلم یک باشد، یک یادگیری معمولی را خواهیم داشت؛ ولی اگر این ضریب ۲ باشد شتاب یادگیری بیشتر خواهد بود. به‌طور کلی هدف از تزریق r و T_f در رابطه بالا ایجاد تنوع جمعیتی است تا فضای جستجو به‌صورت تصادفی توسط افراد جمعیت جستجو شوند. در الگوریتم TLBO پس از تولید جمعیت اولیه، محاسبه میانگین اعضای جمعیت انجام می‌شود و بهترین عضو جمعیت به‌عنوان معلم انتخاب می‌گردد و سپس در فاز معلم با توجه به (۱) بهترین عضو جمعیت شناسایی می‌شود. پس از این مرحله وارد فاز دوم می‌شویم که در ادامه شرح داده خواهد شد.

ب) فاز دانش‌آموز

فاز دانش‌آموز که به آن فاز یادگیری نیز گفته می‌شود بعد از فاز معلم اجرا می‌شود و دانش‌آموزان می‌توانند از یکدیگر نیز آموزش ببینند و بر روی یکدیگر تأثیر بگذارند و این تعامل باعث می‌شود که سطح دانش این دانش‌آموزان ارتقا پیدا نماید. در این فاز که در شکل ۲ مشخص شده است، دانش‌آموزان با تعامل و بحث و گفتگو با یکدیگر سعی در افزایش سطح دانش هم دارند. با توجه به شکل، دو دانش‌آموز به‌صورت تصادفی از بین جمعیت انتخاب می‌شوند. دانش‌آموز اول یعنی X_i می‌خواهد از دانش‌آموز دوم یعنی X_j آموزش ببیند. بسته به میزان نمره این دو دانش‌آموز، دو حالت برای اثرپذیری دانش‌آموز X_i و دانش‌آموز X_j به‌وجود خواهد آمد.

حالت اول) اگر نمرات دانش‌آموز در حال یادگیری از دانش‌آموز آموزش‌دهنده بدتر باشد: در این حالت دانش‌آموز ضعیف X_i می‌خواهد از یک دانش‌آموز با نمرات بهتر X_j آموزش ببیند؛ یعنی تا حد ممکن می‌خواهد فاصله‌اش را با هم‌کلاسی‌اش کم کند. در نتیجه مشابه فاز معلم برای افزایش تنوع جمعیتی به این رابطه ایده‌آل یک ضریب تصادفی r اضافه می‌کنیم. رابطه به‌روزرسانی در این فاز به‌صورت زیر تعریف می‌شود



شکل ۱: توزیع نمرات در فاز معلم.

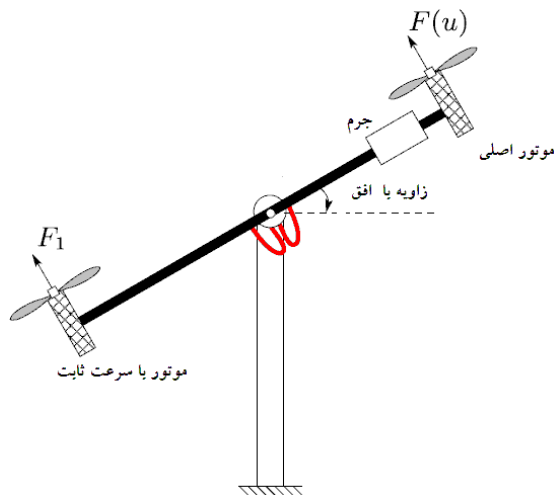
مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم آموزش و یادگیری، عدم وابستگی به پارامترهاست؛ زیرا کمترین تعداد پارامتر ممکن را داراست و از این جهت می‌تواند یک امتیاز ویژه را به خود اختصاص دهد. این الگوریتم نیز مشابه سایر روش‌های بهینه‌سازی موجود، یک الگوریتم برگرفته از طبیعت و مبتنی بر جمعیت است و بر اساس تأثیر یک معلم بر روی یادگیری در کلاس درس کار می‌کند. جمعیت به‌عنوان گروهی از دانش‌آموزان یک کلاس در نظر گرفته می‌شوند. یک معلم تلاش می‌کند تا با آموزش به دانش‌آموزان، سطح دانش کلاس را افزایش دهد. در حقیقت معلم خوب کسی است که دانش‌آموز خود را به سطح دانش خود یا نزدیک به خود برساند. معلم یک شخص با دانش بالا در جامعه بوده که علم خود را با دانش‌آموزان تقسیم می‌کند. بهترین جواب (بهترین عضو جمعیت) در همان تکرار به‌عنوان معلم عمل می‌کند؛ اما لازم است به این نکته اشاره شود که دانش‌آموزان مطابق با کیفیت آموزش ارائه‌شده توسط معلم و وضعیت شاگردان حاضر در کلاس دانش کسب می‌کنند. علاوه بر این دانش‌آموزان از تعامل متقابل بین خودشان که به وضعیتشان کمک می‌کند آموزش می‌بینند. همان‌طور که گفته شد الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری بر اساس تأثیر یک معلم بر روی خروجی دانش‌آموزان در یک کلاس عمل می‌کند و به‌طور کلی در یک کلاس، فردی به‌عنوان معلم تعیین می‌شود که دارای مقدار بهتری از لحاظ تابع هدف است و سطح بالاتری نسبت به دانش‌آموزان دارد و می‌تواند دانش‌آموزان را با دانش خود سهیم نماید. یک معلم خوب، یک میانگین بهتر برای دانش‌آموزان تولید می‌کند. در هر مرحله و تکرار، معلم کسی است که بهترین فرد کلاس باشد و بهترین تابع هدف را دارد. البته در هر مرحله ممکن است معلم تغییر نماید.

نحوه عملکرد الگوریتم TLBO

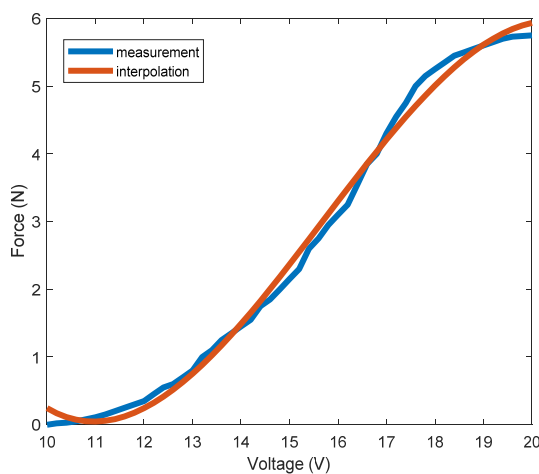
الگوریتم TLBO در دو فاز معلم و دانش‌آموز، کار بهینه‌سازی تابع هزینه را انجام می‌دهد.

الف) فاز معلم

در این فاز که به آن فاز آموزش نیز گفته می‌شود، معلم سعی می‌کند تا میانگین کلاس را به سطح خود برساند و سطح دانش‌آموزان در این مرحله به سمت معلم تغییر می‌نماید. در این الگوریتم، معلم از بین دانش‌آموزان انتخاب می‌شود؛ یعنی کسی که اطلاعاتش از بقیه بیشتر باشد به‌عنوان معلم انتخاب خواهد شد. در شکل ۱ که توزیع نمرات به‌دست‌آمده توسط دانش‌آموزان کلاس را نشان می‌دهد، T_1 به‌عنوان معلم کلاس انتخاب شده و سعی می‌کند که میانگین سطح کلاس یعنی M_1 را به سطح



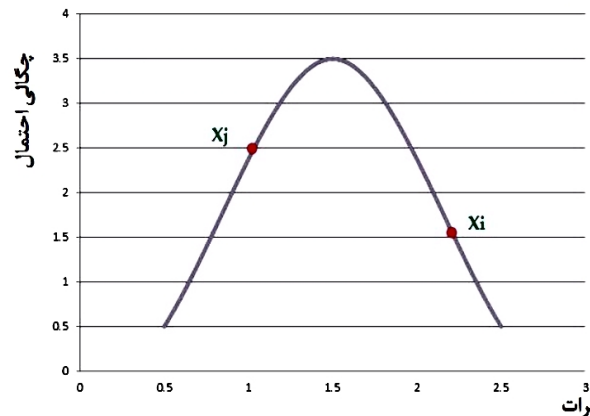
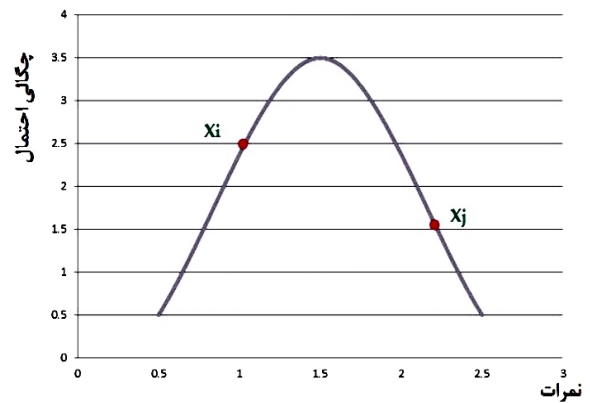
شکل ۳: ساختار روتور دوقلو.



شکل ۴: نمودار درون‌یابی ولتاژ-نیروی موتور M_p .

قرار دارد و کنترل سرعت روی موتور سمت راست انجام می‌شود تا وضعیت میله به صورت افقی صفر درجه درآید.

در این سامانه، θ زاویه محور افقی، M_p موتور سمت چپ با نیروی ثابت F_1 و M_r موتور سمت راست با نیروی متغیر $F(u)$ است که در آن u ولتاژ ورودی است. جرم وزنه (m_r) ۵ g، جرم میله (m_p) ۲۰۰ g و طول میله (L) ۴۸ cm است. موتور M_p دارای سرعت ثابت و نیروی 0.180 N است. نیروی موتور M_r متناسب با ولتاژ ورودی موتور است که با مقادیر مختلف ولتاژ و نیروهای مختلف اندازه‌گیری شده تا در نهایت مشخصه نمودار شکل ۴ به دست آید (نمودار آبی‌رنگ). برای اندازه‌گیری نیروی هر یک از موتورها از یک نیروسنج استفاده شده است. موتور سمت چپ توسط پردازشگر آردوینو روی پهنای پالس PWM ۱۳۰۰ قرار گرفته که نیروی ثابت F_1 و سرعت ثابتی ایجاد می‌کند و توسط نیروسنج و مولتی‌متر نیرو و ولتاژ آن اندازه‌گیری شده است. اما در موتور سمت راست پهنای پالس متغیر تعریف شده و با استفاده از نیروسنج و مولتی‌متر در ۱۰۰ اندازه مختلف نیرو و ولتاژ اندازه‌گیری شده که این اندازه‌گیری‌ها بین PWM ۱۰۰۰ تا PWM ۲۰۰۰ می‌باشد. سپس نیروها و ولتاژهای به دست آمده درون‌یابی گردیده تا رابطه بین نیروی تولید شده توسط M_p یعنی $F(u)$ و ولتاژ ورودی u مشخص شود. رابطه (۴) مربوط به درون‌یابی ولتاژ-نیروی موتور سمت راست است. در شکل ۴ نمودار آبی‌رنگ، نمودار تجربی یا همان اندازه‌گیری ولتاژ و نیرو می‌باشد و نمودار قرمز با درون‌یابی معادله درجه ۳ به دست آمده است



شکل ۲: توزیع نمرات در فاز دانش‌آموز.

$$X_i^{new} = X_i + r(X_j - X_i) \quad (2)$$

حالت دوم اگر نمرات دانش‌آموز در حال یادگیری از آموزش‌دهنده بهتر باشد؛ همان طور که در شکل ۲ مشخص است در این حالت دانش‌آموز در حال یادگیری که همان X_i است از دانش‌آموز در حال آموزش یعنی X_j دارای نمرات بهتری است. برای بهبود وضعیت X_i باید تا حد ممکن از X_j دور شود یا فاصله بگیرد؛ بنابراین عکس حالت قبلی اتفاق خواهد افتاد یعنی

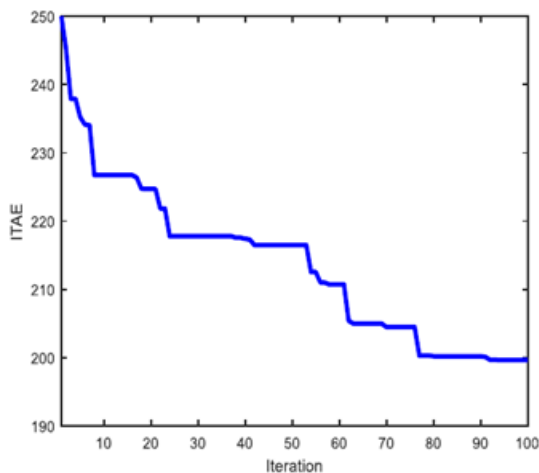
$$X_i^{new} = X_i + r(X_i - X_j) \quad (3)$$

باید به این نکته اشاره کرد که در هر دو فاز معلم و دانش‌آموز با به دست آمدن دانش‌آموز جدید، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود و اگر این مقدار از مقدار تابع هدف دانش‌آموز قدیم بهتر باشد، دانش‌آموز جدید جایگزین دانش‌آموز قدیم می‌شود و در غیر این صورت، دانش‌آموز قدیم بدون تغییر می‌ماند.

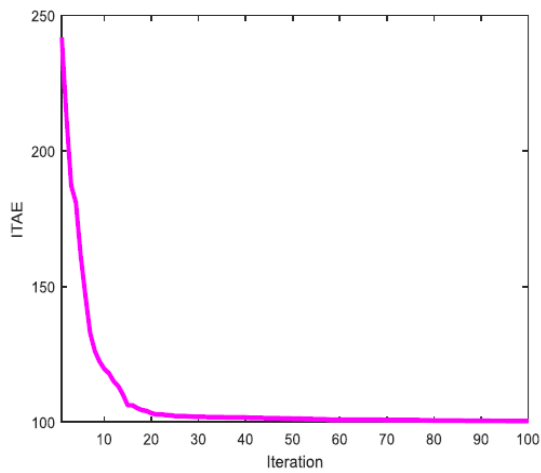
به طور خلاصه در این فاز برای هر پاسخ (عضوی از جمعیت) مانند X_i ، یک پاسخ دیگر X_j به صورت تصادفی انتخاب می‌کنیم. اگر X_i بهتر باشد از (۲) و اگر X_j بهتر باشد از (۳) جهت به‌روزرسانی استفاده می‌کنیم. در نهایت پاسخ‌هایی که بهتر باشند جایگزین پاسخ‌های قدیمی می‌شوند و در مرحله آخر، شرایط خاتمه که توسط طراح تعیین می‌گردد، بررسی می‌شود. در صورت برآورده نشدن شرایط، اجرای الگوریتم از مرحله محاسبه میانگین اعضای جمعیت ادامه می‌یابد و در غیر این صورت الگوریتم خاتمه می‌یابد.

۳- مدل‌سازی روتور دوقلو

در شکل ۳ ساختار روتور دوقلو مشخص شده و موتور سمت چپ با سرعت ثابت در حال چرخش است. وزنه‌ای بر روی بازوی سمت راست



شکل ۶: نمودار همگرایی خوارزمی ژنتیک.



شکل ۵: نمودار همگرایی خوارزمی آموزش و یادگیری.

۴- نتایج شبیه‌سازی

مدل فضای حالت (۱۰) را به همراه یک کنترل‌کننده PID که با ضرایب تناسبی K_p ، انتگرالی K_i و مشتقی K_d مشخص می‌شود، در ساختار حلقه بسته با فیدبک واحد در نظر می‌گیریم. خروجی سیستم برابر $y = x_1 = \theta$ در نظر گرفته می‌شود و خطای سیستم، اختلاف زاویه میله از حالت افقی صفر درجه تعریف می‌گردد ($e = \theta - 0 = \theta$). بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده برای کمینه‌کردن تابع هدف با روش آموزش و یادگیری معرفی شده صورت می‌گیرد. سپس این نتایج با سایر روش‌های فراابتکاری مقایسه می‌گردند. تابع هزینه (هدف) برابر انتگرال حاصل ضرب زمان در قدرمطلق خطا (ITAE) در نظر گرفته شده است. سامانه کنترل طراحی شده با استفاده از این معیار دارای فراجهدش کوچکی خواهد بود. استفاده از این تابع هزینه موجب می‌شود هر خطای اولیه بزرگی به آرامی کاهش یابد و خطاهای رخ داده در زمان‌های بزرگ‌تر به شدت کم شوند.

همان‌طور که بیان شد روش آموزش و یادگیری، یک روش بهینه‌سازی قدرتمند است که می‌توان از آن در جهت کمینه‌کردن تابع هزینه و به‌دست‌آوردن ضرایب مناسب برای کنترل‌کننده PID بهره گرفت. با استفاده از شبیه‌سازی در محیط متلب، نمودار همگرایی الگوریتم TLBO در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودار همگرایی مقدار تابع هزینه ITAE را نشان می‌دهد که با استفاده از روش مذکور به سرعت کاهش یافته و نهایتاً به مقدار ۱۰۰ همگرا شده است. ضرایب PID بهینه‌شده برابر $K_p = ۰.۴۱$ ، $K_i = ۰.۱۱$ و $K_d = ۰.۰۰۱$ هستند. برای مقایسه عملکرد الگوریتم آموزش و یادگیری، شبیه‌سازی با برخی روش‌های فراابتکاری دیگر نیز انجام می‌شود. در شکل ۶ نمودار همگرایی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک رسم شده و با توجه به نمودار همگرایی، مقدار ITAE به عدد ۲۰۰ رسیده است. از نظر زمان رسیدن به مقادیر بهینه نیز الگوریتم آموزش و یادگیری نسبت به الگوریتم ژنتیک عملکرد بهتری داشته است. در شکل ۷ نمودار همگرایی با روش PSO رسم شده است. باز هم از نظر زمان، عملکرد TLBO بهتر بوده و همچنین از نظر مقدار نهایی، تابع هزینه TLBO بهتر عمل کرده است.

در شکل‌های ۸ و ۹ نمودار همگرایی به ترتیب با روش تکامل تفاضلی و رقابت استعماری رسم شده است. نمودار همگرایی، عملکرد ضعیف‌تر این دو الگوریتم در کاهش مقدار تابع هزینه را نسبت به الگوریتم TLBO نشان می‌دهد که در نهایت به عدد ۱۵۱ و ۱۷۶ رسیده است. پارامترهای اصلی در الگوریتم ازدحام ذرات به صورت $w = ۰.۷$ ، $c_1 = ۲$ و $c_2 = ۲$

$$F(u) = -۰.۰۱۴۱u^7 + ۰.۶۶۲۲u^2 - ۹.۴۴۶۸u + ۴۲.۵۶۵۳ \quad (۴)$$

از طرف دیگر با توجه به فرم میله و محل قرارگرفتن کوپلینگ، برای محاسبه سختی میله از رابطه زیر استفاده شده است

$$I = \frac{1}{۱۲} m_r L^2 \quad (۵)$$

با توجه به مقادیر پارامترها در این مسئله خواهیم داشت

$$I = \frac{1}{۱۲} \times ۰.۲ \times ۰.۴۸^2 = ۰.۰۰۳۸۴ \quad (۶)$$

همچنین برای این سامانه، رابطه بین شتاب زاویه‌ای و گشتاورهای تولیدی توسط دو موتور سمت راست و چپ و جرم m_r برابر است با

$$I\ddot{\theta} = \tau_{M_r} + \tau_{M_l} + \tau_{m_r} \quad (۷)$$

گشتاور تولیدی توسط موتور M_r برابر با $F(u)(L/۲)\cos\theta$ است. به این ترتیب رابطه زیر به‌دست می‌آید

$$\frac{1}{۱۲} m_r L^2 \ddot{\theta} = F(u) \frac{L}{۲} \cos\theta - F_l \frac{L}{۲} \cos\theta - m_r g L \cos\theta \quad (۸)$$

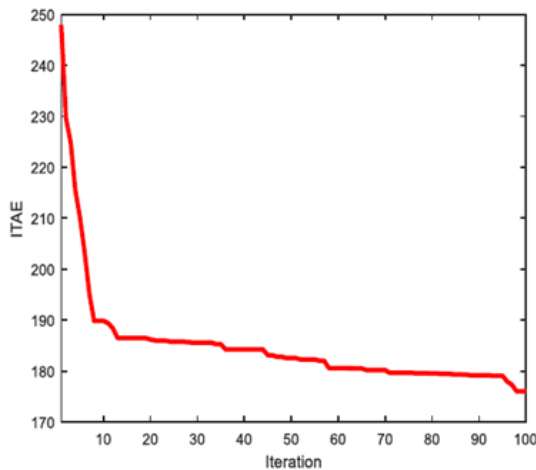
با تعریف متغیرهای حالت به صورت $x_1 = \theta$ و $x_2 = \dot{\theta}$ و تعریف ولتاژ ورودی موتور سمت راست به‌عنوان ورودی کنترل u ، معادله حالت به‌صورت زیر خواهد بود

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{\frac{1}{12} m_r L^2} \times [F(u) \frac{L}{2} \cos x_1 - F_l \frac{L}{2} \cos x_1 - m_r g L \cos x_1] \end{aligned} \quad (۹)$$

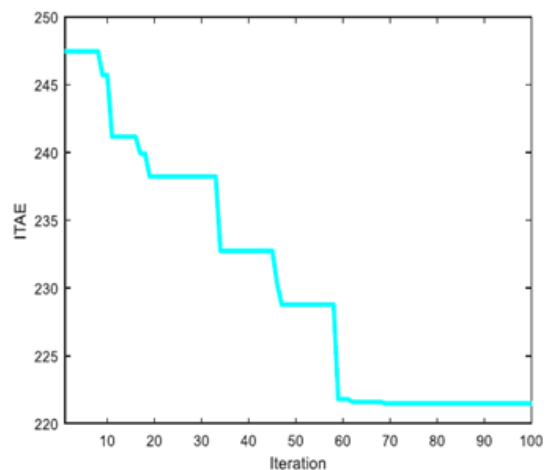
با جایگذاری مقادیر پارامترها و نیز $F(u)$ از (۴) به معادله حالت غیرخطی زیر می‌رسیم

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \cos x_1 \times (-۰.۸۸۱۲۵u^7 + ۴۱.۳۸۷۵u^2 - ۵۹.۴۲۵u + ۲۶.۰۹۷۰۶۲۵) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

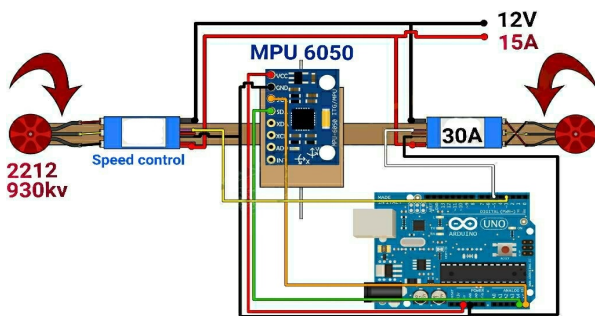
با خطی‌سازی این سامانه غیرخطی حول مبدأ مشاهده خواهد شد که مقادیر ویژه این سیستم، هر دو در مبدأ قرار دارند. از مدل به‌دست‌آمده در (۱۰) جهت به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه برای ضرایب PID استفاده خواهیم نمود.



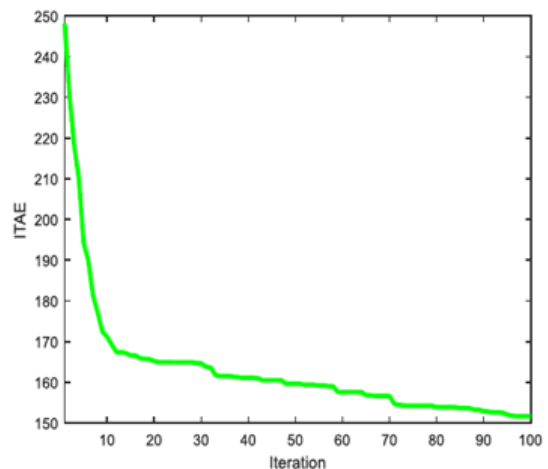
شکل ۹: نمودار همگرایی خوارزمی رقابت استعماری.



شکل ۷: نمودار همگرایی خوارزمی PSO.



شکل ۱۰: شماتیک مدار الکترونیکی برای ساخت روتور دوقلو.



شکل ۸: نمودار همگرایی خوارزمی تکامل تفاضلی.

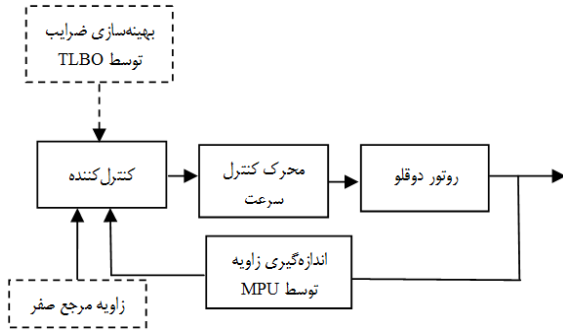
۵- نتایج آزمایشگاهی

برای ساخت روتور دوقلو از ترکیب چند قطعه و المان مکانیکی در کنار بردهای الکترونیکی استفاده شده است. این قطعات شامل آداپتور ۱۲ V، موتور برانشلس ۹۳۰ Kv، کنترل سرعت ۳۰ A، ماژول MPU۶۰۵۰، دو عدد ملخ موتور، بازوی آلومینیومی، پایه فلزی، بلبرینگ و وزنه پلاستیکی است. تغذیه برد آردوینو و سنسور از طریق ولتاژ ۵ V کنترل سرعت تأمین می‌شود. ماژول MPU۶۰۵۰ توسط پروتکل I2C ۱۲ به برد آردوینو، وصل و برای اتصال از پایه‌های SCL و SDA استفاده می‌شود. پایه ۳ آردوینو به کنترل سرعت سمت راست و پایه ۵ آردوینو به کنترل سرعت سمت چپ وصل گردیده و نحوه اتصال در شکل ۱۰ مشخص شده است.

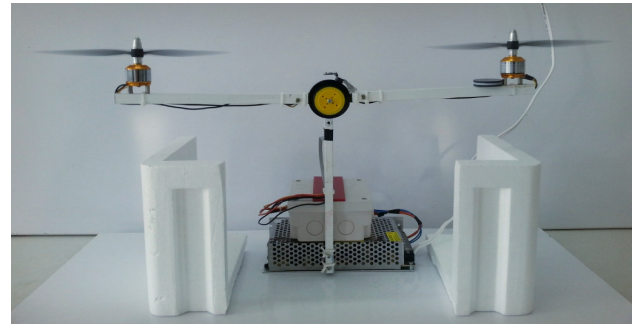
وضعیت سامانه از سنسور MPU۶۰۵۰ گرفته می‌شود و زاویه انحراف را نسبت به حالت مطلوب که همان صفر درجه است اندازه می‌گیرد و تلاش می‌کند تا سیگنال مطلوب را با پهنای پالس بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میکروثانیه به کنترل سرعت بدهد تا به حالت تعادل برسد. ماژول MPU۶۰۵۰ می‌تواند شتاب خطی را در سه محور و شتاب زاویه‌ای را حول هر سه محور اندازه‌گیری کند. این سنسور نمی‌تواند مستقیماً زاویه را اندازه‌گیری کند و برای اندازه‌گیری زاویه نیاز به یک سری محاسبات است. سنسور MPU۶۰۵۰ با ولتاژ ۳.۳ ولت کار می‌کند؛ اما معمولاً بر روی ماژول‌های این سنسور یک رگولاتور وجود دارد که می‌توان ماژول را به ۵ ولت وصل کرد. روتور دوقلوی ساخته‌شده در آزمایشگاه کنترل دانشگاه اراک با قطعات ذکر شده در شکل ۱۱ و ساختار بلوک دیاگرام سامانه کنترل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

کنترل‌کننده تنظیم‌شده با روش آموزش و یادگیری را بر روی سامانه ساخته‌شده پیاده‌سازی می‌کنیم. شکل ۱۳ نمودار پلاتر سامانه روتور دوقلو را در نرم‌افزار آردوینو نشان می‌دهد که با استفاده از ضرایب PID

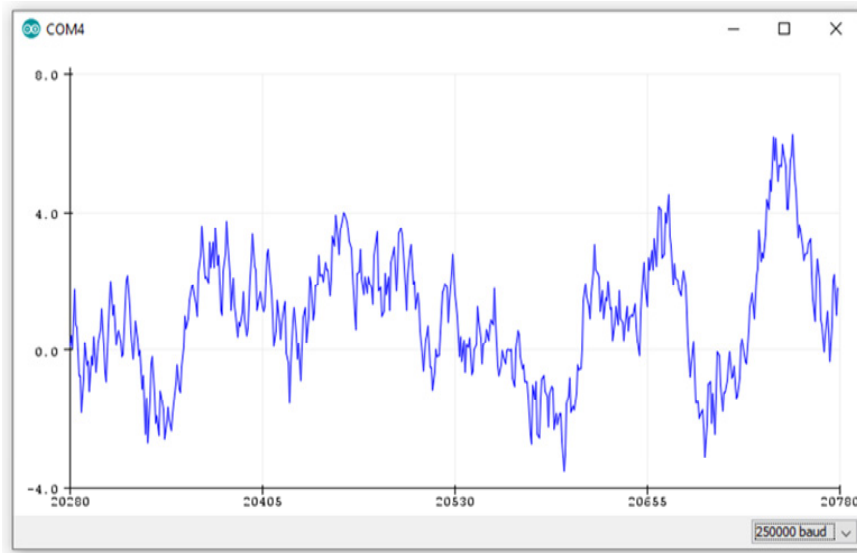
هستند که c_1 و c_2 به ترتیب ضرایب آموزش شخصی و جهانی و وزن می‌باشد. پارامترهای اصلی در الگوریتم ژنتیک $pCR = 0.2$ ، $\beta_{min} = 0.2$ و $\beta_{max} = 0.8$ هستند که pCR چرخه تکامل و β_{min} و β_{max} اعضای جمعیت هستند. پارامترهای اصلی در الگوریتم تکامل تفاضلی $nCrossover = 2$ ، $nMutation = 2$ ، $pMutation = 0.2$ و $pCrossover = 0.7$ هستند که $nMutation$ اپراتور جهش و $Crossover$ اپراتور تقاطع می‌باشند. پارامترهای اصلی در الگوریتم رقابت استعماری به صورت $nCol = 10$ ، $pRevolution = 0.1$ و $nImp = 10$ هستند که $nCol$ تعداد مستعمرات، $nImp$ تعداد امپراطوری‌ها و $pRevolution$ انقلاب‌ها می‌باشند. مزیت مهم الگوریتم آموزش و یادگیری، نداشتن پارامترهای کنترلی است و صرفاً با مشخص کردن تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت کار می‌کند. به ازای مقادیر یکسان برای تعداد نسل‌ها در همه الگوریتم‌های ذکر شده، نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۵ تا ۹ آمده‌اند. البته باید توجه داشت که قطعاً با تغییر مقادیر پارامترهای الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک، رقابت استعماری و تکامل تفاضلی احتمالاً می‌توان به نتایج بهتری دست یافت؛ اما نکته مهم اینجاست که تنظیم این پارامترها مستلزم تلاش قابل توجه و مراجعه به روش‌های متنوع ارائه‌شده جهت تنظیم آنهاست. با وجود این، الگوریتم آموزش و یادگیری بدون تنظیمات خاصی به نتایج قابل قبولی دست یافته است.



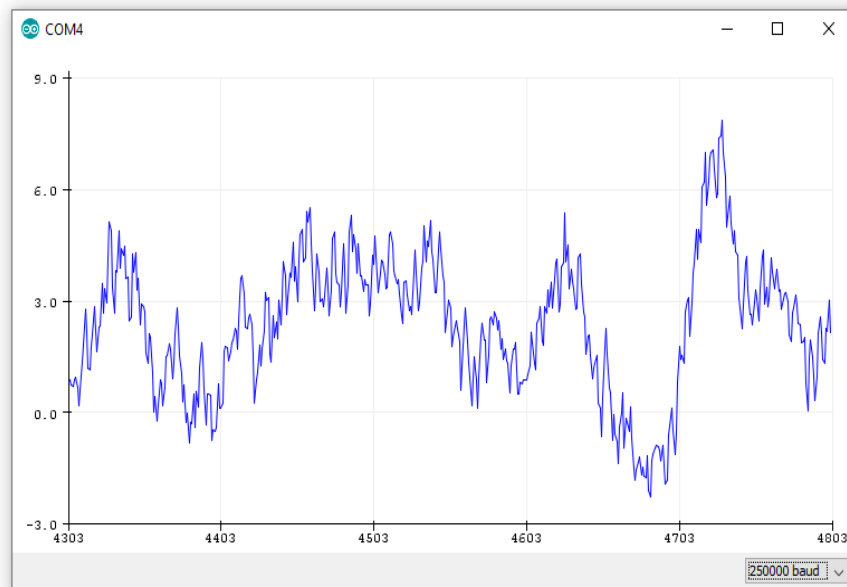
شکل ۱۲: بلوک دیاگرام سامانه کنترل.



شکل ۱۱: روتور دوقلوی ساخته‌شده در آزمایشگاه کنترل.



شکل ۱۳: نمودار پلاتر دریافتی از سنسور موقعیت زاویه‌ای با روش TLBO.



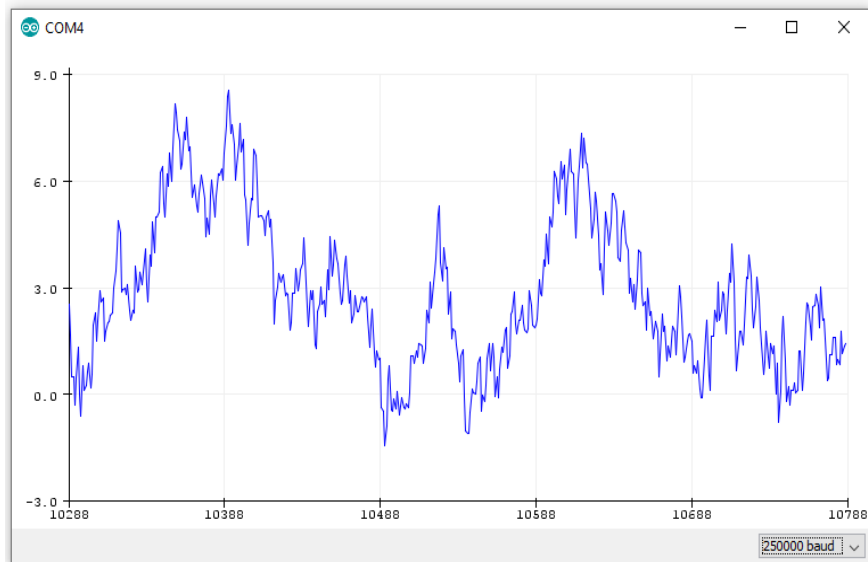
شکل ۱۴: نمودار پلاتر دریافتی از سنسور موقعیت زاویه‌ای با روش رقابت استعماری.

پیاده‌سازی آزمایشگاهی سامانه و پایدارسازی روتور دوقلو توسط کنترل‌کننده بهینه‌شده نمایش داده شده و نتایج آزمایشگاهی تأییدکننده نتایج شبیه‌سازی هستند.

۶- نتیجه‌گیری

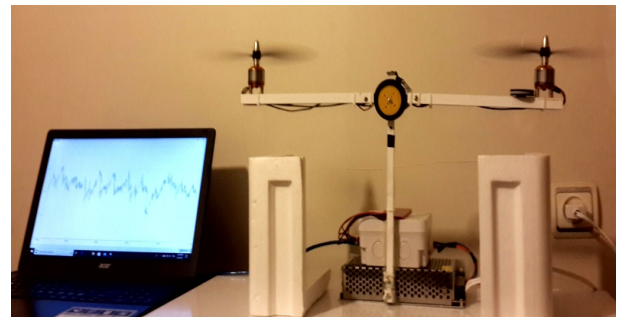
در این مقاله، یک کنترل‌کننده PID بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری برای کنترل موقعیت محور یک سامانه روتور دوقلوی

بهینه‌شده توسط الگوریتم آموزش و یادگیری به پایداری رسیده است. در این شکل داده‌های دریافتی از سنسور موقعیت در هر میلی‌ثانیه رسم شده است. این نمودار در جهت محور عمودی، زاویه روتور دوقلو و در جهت افقی، مدت زمان بر حسب میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. نمودار بیان می‌کند که محور روتور دوقلو حول زاویه صفر درجه می‌باشد. جهت مقایسه، نمودار پلاتر حاصل از روش‌های رقابت استعماری و تکامل تفاضلی نیز به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آورده شده است. همچنین در شکل ۱۶



شکل ۱۵: نمودار پلاتر دریافتی از سنسور موقعیت زاویه‌ای با روش تکامل تفاضلی.

- [4] N. Almtireen, H. Elmoaqet, and M. Ryalat, "Linearized modelling and control for a twin rotor system," *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 52, no. 6, pp. 539-551, Jan. 2018.
- [5] A. Tastemirov, A. Lecchini-Visintini, and R. M. Morales-Viviescas, "Complete dynamic model of the twin rotor MIMO System (TRMS) with experimental validation," *Control Engineering Practice*, vol. 66, pp. 89-98, Sept. 2017.
- [6] M. Z. Ghellab, S. Zeghlache, A. Djerioui, and L. Benyettou, "Experimental validation of adaptive RBFNN global fast dynamic terminal sliding mode control for twin rotor MIMO system against wind effects," *Measurement*, vol. 168, Article ID:108472, Jan. 2021.
- [7] W. Netto, R. Lakhani, and S. M. Sundaram, "Design and performance comparison of different adaptive control schemes for pitch angle control in a twin-rotor-MIMO-system," *International J. of Electrical & Computer Engineering*, vol. 9, pp. 2088-8708, Oct. 2019.
- [8] B. Pratap and S. Purwar, "Real-time implementation of nonlinear state and disturbance observer-based controller for twin rotor control system," *International J. of Automation and Control*, vol. 13, no. 4, pp. 469-497, Mar. 2019.
- [9] P. K. Paul and J. Jacob, "On the modeling of twin rotor MIMO system using chirp inputs as test signals," *Asian J. of Control*, vol. 19, no. 5, pp. 1731-1740, Apr. 2017.
- [10] M. Parvizian, K. Khandani, and V. J. Majd, "A non-fragile observer-based adaptive sliding mode control for fractional-order Markovian jump systems with time delay and input nonlinearity," *Trans. of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, no. 8, pp. 1448-1460, May 2020.
- [11] H. Zamani, K. Khandani, and V. J. Majd, "Fixed-time sliding-mode distributed consensus and formation control of disturbed fractional-order multi-agent systems," *ISA Trans.*, vol. 138, pp. 37-48, Jul. 2023.
- [12] M. Parvizian and K. Khandani, "Robust H_∞ sliding mode control scheme for uncertain fractional stochastic systems: nonlinear analysis and design," *Asian J. of Control*, vol. 25, no. 5, pp. 4086-4095, Feb. 2023.
- [13] K. Khandani, V. J. Majd, and M. Tahmasebi, "Robust stabilization of uncertain time-delay systems with fractional stochastic noise using the novel fractional stochastic sliding approach and its application to stream water quality regulation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 62, no. 4, pp. 1742-1751, Apr. 2017.
- [14] M. Parvizian and K. Khandani, "A diffusive representation approach toward H_∞ sliding mode control design for fractional-order Markovian jump systems," in *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: J. of Systems and Control Engineering*, vol. 235, no. 7, pp. 1154-1163, Aug. 2021.
- [15] A. N. Vargas, M. A. Montezuma, X. Liu, L. Xu, and X. Yu, "Sliding-mode control for stabilizing high-order stochastic systems: application to one-degree-of-freedom aerial device," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 11, pp. 4318-4325, Nov. 2018.
- [16] F. Faris, A. Moussaoui, B. Djamel, and T. Mohammed, "Design and real-time implementation of a decentralized sliding mode controller for twin rotor multi-input multi-output system," *Proc. of the*



شکل ۱۶: پایدارسازی آزمایشگاهی روتور دوقلو با روش ارائه شده.

یک درجه آزادی طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شد. نتایج حاصل از الگوریتم آموزش و یادگیری با الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، تکامل تفاضلی و رقابت استعماری مقایسه گردید. مقایسه تابع هزینه ITAE بهینه‌شده با الگوریتم‌های هوشمند از عملکرد مناسب الگوریتم آموزش و یادگیری نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی حکایت می‌کند. مزیت عدم نیاز به تنظیم پارامترهای الگوریتم آموزش و یادگیری و در عین حال تولید پاسخ مناسب مسئله‌ای بود که در این مقاله با شبیه‌سازی نشان داده شد. قطعاً با تنظیمات بهینه سایر روش‌ها، احتمال رسیدن به پاسخ بهتر وجود دارد؛ اما اگر قرار باشد مصالحه‌ای بین سادگی کاربرد الگوریتم و میزان بهینگی پاسخ برقرار شود، روش آموزش و یادگیری ارجح خواهد بود. همچنین پاسخ عملکرد تجربی سامانه روتور دوقلوی یک درجه آزادی (نمودارهای پلاتر در آردوینو) نشان از عملکرد مناسب سیستم کنترلی معرفی شده دارد.

مراجع

- [1] Y. Xin, Z. C. Qin, and J. Q. Sun, "Input-output tracking control of a 2-DOF laboratory helicopter with improved algebraic differential estimation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 116, pp. 843-857, Feb. 2019.
- [2] R. F. Faisal and O. W. Abdulwahhab, "Design of an adaptive linear quadratic regulator for a twin rotor aerodynamic system," *J. of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 404-415, Jan. 2021.
- [3] L. Dutta and D. K. Das, "A new adaptive explicit nonlinear model predictive control design for a nonlinear MIMO system: an application to twin rotor MIMO system," *International J. of Control, Automation and Systems*, vol. 19, no. 7, pp. 2406-2419, Mar. 2021.

- system," *J. of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 101, no. 3, pp. 1-16, Dec. 2021.
- [25] R. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems," *Information Sciences*, vol. 183, no. 1, pp. 1-15, May 2012.
- [26] R. Rao, "Review of applications of TLBO algorithm and a tutorial for beginners to solve the unconstrained and constrained optimization problems," *Decision Science Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 1-30, Feb. 2012.
- [27] A. Abaeifar, H. Barati, and A. R. Tavakoli, "Inertia-weight local-search-based TLBO algorithm for energy management in isolated micro-grids with renewable resources," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 137, Article ID: 107877, Apr. 2022.
- [28] S. Chafea, K. Kamel, and B. Mohamed, "Optimized FLPID using TLBO algorithm: applied to quadrotor (UAV) system," in *Proc. Int. Conf. on Advances in Electronics, Control and Communication Systems, ICAECCS'23*, 6 pp., BLIDA, Algeria, 6-7 Mar. 2023.
- [29] N. Bouhabza and K. Kara, "Optimized sliding mode based PID controller for a quadrotor system," *ICAE'22*, 5 pp., Constantine, Algeria, Sept. 2022.
- [30] N. Karimi and K. Khandani, "Social optimization algorithm with application to economic dispatch problem," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 30, Article ID: e12593, Jul. 2020.
- مصطفی یزدانی** تحصیلات خود را در دانشگاه اراک در مقطع کارشناسی ارشد مکترونیک در سال ۱۳۹۷ به اتمام رساند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان الگوریتم‌های بهینه‌سازی، دینامیک پرواز و کنترل می‌باشند.
- خسرو خاندانی** مدرک دکترای خود را در سال ۱۳۹۵ در رشته مهندسی برق - کنترل از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. ایشان هم‌اکنون به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه اراک فعالیت می‌کند. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم‌های چندعملی، کنترل مرتبه کسری، یادگیری ماشین و اتوماسیون صنعتی می‌باشند.
- Institution of Mechanical Engineers, Part I: J. of Systems and Control Engineering*, vol. 231, no. 1, pp. 3-13, Jan. 2017.
- [17] S. K. Pandey, J. Dey, and S. Banerjee, "Design of robust proportional-integral-derivative controller for generalized decoupled twin rotor multi-input-multi-output system with actuator non-linearity," in *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: J. of Systems and Control Engineering*, vol. 232, no. 8, pp. 971-982, Aug. 2018.
- [18] K. Khandani, A. A. Jalali, and M. Alipoor, "Particle swarm optimization based design of disturbance rejection PID controllers for time delay systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, pp. 862-866, Shanghai, China, 20-22 Nov. 2009.
- [19] K. Khandani and A. A. Jalali, "PSO based optimal fractional PID controller design for an active magnetic bearing system," in *Proc. of 18th Annual Int. Conf. on Mechanical Engineering*, 6 pp., Tehran, Iran, 11-11 May 2010.
- [20] K. Khandani and A. A. Jalali, "Robust fractional order control of a DC motor based on particle swarm optimization," *Advanced Materials Research*, vol. 403-408, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 5030-5037, Nov. 2011.
- [21] J. G. Juang, M. T. Huang, and W. K. Liu, "PID control using presearched genetic algorithms for a MIMO system," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 5, pp. 716-727, Jan. 2008.
- [22] G. D. Prasad, P. S. Manoharan, and A. P. S. Ramalakshmi, "PID control scheme for twin rotor MIMO system using a real valued genetic algorithm with a predetermined search range," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power, Energy and Control, ICPEC'13*, pp. 443-448, Dindigul, India, 6-8 Feb. 2013.
- [23] R. Maiti, K. D. Sharma, and G. Sarkar, "PSO based parameter estimation and PID controller tuning for 2-DOF nonlinear twin rotor MIMO system," *International J. of Automation and Control*, vol. 12, no. 4, pp. 582-609, Oct. 2018.
- [24] M. Kumar and Y. V. Hote, "Real-time performance analysis of PID2 controller for nonlinear twin rotor TITO aerodynamical