

## بهبود عملکرد و صرفه‌جویی انرژی با بهینه‌سازی از طریق الگوریتم رقابت استعماری در سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره جدید

میثم یحیی‌زاده<sup>۱\*</sup>، معظمه صادقی<sup>۲</sup>، حسن فاتحی مرج<sup>۳</sup>، سید میلاد بابایی<sup>۴</sup>، محمدعلی افتخاری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

yahyazadeh@vru.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

moazameh.sadeghi@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

h.fatehi@vru.ac.ir

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

s.milad.babaei@gmail.com

<sup>۵</sup> دانشجوی کارشناسی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

ma.efte.1996@gmail.com

**چکیده:** اساس کار سیستم‌های فتولتائیک، تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی است؛ از این رو، حداکثر کارایی سیستم‌های فتولتائیک با قرار گرفتن سیستم با زاویه عمود نسبت به خورشید حاصل می‌شود و برای رسیدن به حداکثر توان و کارایی سلول فتولتائیک، ردیابی موقعیت خورشید با دقت بسیار، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله، ردیاب دومحوره چرخان-خطی جدیدی طراحی و ساخته شده است که در مقابل اثرات محیطی مقاوم بوده و انرژی مصرفی موتورها را به حداقل می‌رساند. در ضمن به منظور ردیابی سریع‌تر و صرفه‌جویی بیشتر انرژی مصرفی، پارامترهای کنترل‌کننده با الگوریتم رقابت استعماری بهینه شده است. بهینه‌سازی پارامترهای کنترل سیستم برای هر دو حالت یک‌محوره و دومحوره موجب بهره‌وری بیشتر آن شده، به طوری که علاوه بر کاهش فراجش و زمان نشست، انرژی مصرفی موتورها نیز کاهش یافته است. همچنین به منظور نشان دادن کارایی و بهبود عملکرد سیستم، مقایسه‌ای بین سرعت ردیابی و انرژی مصرفی موتورها با الگوریتم‌های ژنتیک، زنبور عسل، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی و الگوریتم رقابت استعماری صورت گرفته است. نتایج حاکی از آن است که الگوریتم رقابت استعماری عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها و روش‌ها داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم فتولتائیک، ردیاب خورشیدی، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم‌های بهینه‌سازی.

## ۱. مقدمه

مقایسه‌ای بین ردیاب یک‌محوره و حالت ثابت انجام شده است. در این مقاله، نشان داده شده است که ردیاب خورشیدی نسبت حالت ثابت ۲۰٪ توان بیشتری تولید می‌کند. همچنین، ردیاب دومحوره طراحی شده در مرجع [۱۱] افزایش ۳۳ درصدی نسبت به حالت ثابت را نشان می‌دهد. در مرجع [۱۲] انواع ردیاب‌ها مورد بررسی قرار گرفت؛ برای مثال ردیاب‌های مبتنی بر سنسورهای نوری، بر مبنای موقعیت نجومی، و ردیاب مبتنی بر تاریخ و زمان. ردیاب اول، از طریق اختلاف شدت نور در سنسورهای نوری می‌تواند جهت خورشید را تشخیص داده و بر اساس آن جهت پنل را از طریق حرکت موتورها با استفاده از یک ریزپردازنده تنظیم کند. ردیاب دوم، رایانه موقعیت خورشیدی را بر اساس تاریخ و زمان محاسبه کرده و موتورها را برای دستیابی به موقعیت مطلوب کنترل می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از ردیاب خورشیدی ثابت در حالت با سنسور و بدون سنسور در مرجع [۱۳] آورده شده و حاکی از آن است که در حالت بدون سنسور در فصل پاییز ۱۹/۱٪، در فصل زمستان ۲۲/۴٪، در فصل بهار ۲۶/۱٪ و سالیانه ۲۴/۵۹٪ افزایش تولید توان صورت گرفته است، درحالی‌که در حالت ردیاب با سنسور در فصول سال به ترتیب ۲۷/۷٪، ۳۲/۵٪، ۴۲/۷٪ و سالیانه ۳۵/۲۲٪ افزایش حاصل شده است. در مرجع [۱۴] ردیاب خورشیدی دومحوره با به‌کارگیری سنسورهای نوری طراحی شده است.

یک ردیاب دومحوره در مرجع [۱۵] بر اساس پردازش تصاویر سایه‌میل‌های پیشنهاد شد. این سیستم از یک جسم، یک دوربین برای ثبت تصاویر سایه، مدارهای الکترونیکی، کنترل‌کننده‌های کامپیوتری و موتورهای پله‌ای تشکیل شده است. نتایج نشان می‌دهد دقت ردیابی حدود  $\pm 2$  درجه بوده و می‌تواند در هر منطقه جغرافیایی مورد استفاده قرار گیرد. یک دستگاه الکترونیکی در مرجع [۱۶] عمل کنترل سیستم را برای ردیابی دومحوره بر عهده دارد که علاوه بر کنترل موتورها، ذخیره‌سازی انرژی، اطلاعات تابشی از پنل را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین، مقایسه‌ای بین حالت ثابت و متحرک طی ۱۵۲ روز، بین ماه‌های ژوئن و نوامبر ۲۰۱۶ در جنوب برزیل انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ردیابی به‌طور متوسط افزایش درآمدزایی ماهیانه بین ۲۰/۱۷٪ تا ۳۱/۱٪ نسبت به حالت ثابت داشته است. در مرجع [۱۷]، پارامترهای کنترلی سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره از طریق الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات<sup>۳</sup> با روش تاگوچی<sup>۴</sup> و نقشه لجستیک<sup>۵</sup> به دست آمده است. به‌کارگیری روش تاگوچی و نقشه لجستیک همگرایی حالت پایدار PSO را در جست‌وجوی راه‌حل بهینه ارتقا بخشیده و

امروزه با گسترش صنعت و افزایش جمعیت، نیاز به انرژی روزبه‌روز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی رو به پایان است، بشر باید به فکر جایگزینی مناسب برای انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی باشد. استفاده از انرژی اتمی با توجه به هزینه‌های سنگین و تشعشعات خطرناک نیروگاهی نمی‌تواند جانشینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی باشد. آلودگی ناشی از این سوخت‌ها ما را مجبور می‌سازد که جایگزینی بهتر برای آن‌ها در نظر بگیریم. از این رو، دیدگاه عمومی نظر خود را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است [۱-۳]. پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر فرصت تولید برق ماندگار و ارزان را از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌دهد [۴]. در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتائیک<sup>۱</sup> به دلیل اینکه منبع بدون آلاینده بوده و در هر جایی که خورشید باشد، قابل استفاده است، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است [۵]. انرژی خورشیدی یک منبع غیرآلاینده است و برخلاف انرژی‌های بادی که به باد متناسب نیاز دارند، امکان نصب آن در اکثر مکان‌ها وجود دارد. پنل‌ها را می‌توان با حداقل مساحت نصب کرد. انرژی خورشیدی نسبت به انرژی‌های وابسته به نیروهای آبی مزیت‌های بسیاری دارد. اگرچه انرژی‌های وابسته به نیروهای آبی تجدیدپذیر است، هزینه زیاد و عدم امکان نصب در بسیاری از مناطق و تأثیرات محیطی مانند سیل و تخریب زیست‌محیطی آن، باعث می‌شود که به‌کارگیری انرژی خورشیدی در اولویت باشد. پنل‌های خورشیدی<sup>۲</sup> در سیستم‌های فتوولتائیک معمولاً به‌طور ثابت نصب می‌شوند و به تغییرات زاویه خورشید حساس نیستند. درحالی‌که انرژی دریافتی از خورشید به‌شدت به زاویه تابشی به پنل وابسته است. در این حالت، کارایی سیستم در طول روز برای دریافت انرژی پایین خواهد بود [۶]. با توجه به متغیر بودن موقعیت خورشید در طول روز، سیستم‌های ردیابی خورشیدی در جذب انرژی و دریافت حداکثر توان از خورشید می‌توانند نسبت به حالت ثابت بسیار کارا تر باشند [۷]. در واقع زاویه پنل نسبت به خورشید در دریافت انرژی بسیار مؤثر است [۸]. علاوه بر این، تولید توان توسط پنل‌های خورشیدی بسیار محدود است و راندمان آن‌ها با پیشرفت تکنولوژی به‌کندی پیش می‌رود. افزایش حتی چند درصد از توان دریافتی از این پنل‌ها بدون تغییر در ساختار پنل می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. بیشترین انرژی از نور خورشید در زاویه عمود نسبت به پنل دریافت می‌شود و این عامل ارتباط مستقیم با انرژی دریافتی از خورشید دارد [۹]. در مرجع [۱۰]

3. Particle Swarm Optimization (PSO)  
4. Taguchi  
5. Logistic Map

1. Photovoltaic (PV)  
2. Solar Panel

PID مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]. همچنین، با توجه به سرعت و دقت بالا در سال‌های اخیر در بین محققان محبوبیت زیادی به دست آورده است و برای مدل‌سازی سیستم‌های فنولتائیک و مسائل چندهدفه کارایی بالایی دارد [۲۵]. در این مقاله، نوع جدیدی از سیستم ردیاب دومحوره خورشیدی ارائه شده است. این ردیاب دارای محورهای دورانی (چرخان) و خطی می‌باشد که به ترتیب زوایای ۳۶۰ در محور دورانی و ۹۰ درجه در محور خطی را تأمین نموده به طوری که پوشش نیم‌کره‌ای کامل را در بر بگیرد. استفاده از این دو محور باعث می‌شود که ضمن سرعت ردیابی بالا، نسبت به عوامل محیطی مانند باد استحکام بالایی داشته باشد و همچنین میزان مصرف انرژی موتورهای کاهش یابد. ضمن اینکه با به‌کارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی منتخب (رقابت استعماری) در میان چند الگوریتم بهینه‌سازی دیگر، ضرایب کنترلی سیستم بهینه شده تا کمترین میزان مصرف انرژی و بیشترین سرعت ردیابی را در سیستم عملی دارا باشد؛ که نشان می‌دهد الگوریتم رقابت استعماری در میان چند الگوریتم دیگر کارایی بالاتری خواهد داشت. از آنجا که افزایش سرعت و دقت ردیابی در سیستم‌های فنولتائیک موضوع حائز اهمیتی است، با بهینه کردن پارامترهای کنترلی توسط این الگوریتم با کاهش فراجهدش و زمان نشست، سرعت و دقت ردیابی سیستم دومحوره چرخان-خطی افزایش خواهد یافت. نیز در این مقاله مقایسه بین عملکرد کنترل‌کننده P و کنترل‌کننده PID بهینه‌شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، زنبور عسل، بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی<sup>۱۴</sup> و الگوریتم رقابت استعماری صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از آن است که با بهینه‌سازی ضرایب کنترلی سیستم توسط الگوریتم رقابت استعماری نسبت به سایر الگوریتم‌ها عملکرد بهتری شاهد خواهیم بود، به طوری که موجب افزایش دریافت توان تولیدی و کاهش انرژی مصرفی موتورهای باتری پشتیبان خواهد شد. ادامه این مقاله به صورت زیر تنظیم شده است:

در بخش دوم، توضیحات کلی درباره ساختار سیستم دومحوره چرخان-خطی و در بخش سوم مدل‌سازی موتور DC ارائه شده است. در بخش چهارم الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این بخش، مقایسه‌ای بین عملکرد پارامترهای PID بهینه‌شده با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، زنبور عسل، بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی، الگوریتم رقابت استعماری در محیط متلب انجام گرفته است. بخش پنجم نتایج عملی شامل مقایسه توان دریافتی، سرعت ردیابی، انرژی مصرفی موتورهای بهره‌های متفاوت کنترل‌کننده P و کنترل‌کننده PID بهینه‌شده با الگوریتم‌های مذکور را در سه حالت ثابت،

بدین ترتیب پارامترهای بهینه سریع‌تر و دقیق‌تر محاسبه می‌شود. پارامترهای کنترل‌کننده PID موتور DC در مرجع [۱۸] نیز با الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات تنظیم شده است. نتایج روی چهار سیستم مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده که به‌کارگیری ضرایب به‌دست‌آمده در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات باعث افزایش دقت و پایداری سیستم شده است. در مرجع [۱۹] پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی<sup>۱</sup> سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره با سه الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>۲</sup>، الگوریتم فاخته<sup>۳</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، بهینه‌سازی و مورد بررسی قرار داده شد. مشاهده شد که الگوریتم کرم شب‌تاب سرعت همگرایی بهتری داشته است. در مرجع [۲۰]، کنترل‌کننده PID-PSO برای دستیابی حداکثر نقطه توان در سیستم‌های فنولتائیک اعمال شده است. همچنین، مقایسه‌ای بین عملکرد PID-PSO با روش مشاهده و خطا (P&O) انجام گرفته و نتایج حاصل در نرم‌افزار متلب<sup>۴</sup> حاکی از آن است که PID-PSO در دریافت توان بیشتر از خورشید در وضعیت مختلف آب‌وهوایی، عملکرد بهتر و مؤثرتری نسبت به روش مشاهده و خطا نشان داده است. روش PID بر مبنای منطق فازی برای کنترل موتور سرو<sup>۵</sup> یک سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره در مرجع [۲۱] ارائه شده است. در روش پیشنهادی پارامترهای کنترل‌کننده PID به صورت آنی<sup>۶</sup> با استفاده از منطق فازی<sup>۷</sup> محاسبه می‌شوند. مرجع [۲۲] از الگوریتم رقابت استعماری<sup>۸</sup> برای تخمین پارامترهای مدل سیستم‌های فنولتائیک استفاده کرده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم رقابت استعماری از الگوریتم PSO، الگوریتم زنبور عسل<sup>۹</sup> و الگوریتم تفاضلی<sup>۱۰</sup> بهتر عمل نموده است. بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی ترکیبی بادی و فنولتائیک که شامل منابع انرژی باتری و ژنراتور دیزل هستند، با تابع هدف هزینه انرژی و قیمت برق در مرجع [۲۳] مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، که تابع هزینه انرژی<sup>۱۱</sup> با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی ژنتیک-انبوه ذرات<sup>۱۲</sup> و بهینه‌سازی انبوه ذرات چندهدفه<sup>۱۳</sup> به حداقل می‌رسد. الگوریتم رقابت استعماری در زمینه‌های بسیاری از جمله تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده

1. Proportional-Integral-Derivative
2. Fire Flay Algorithm(FFA)
3. Cuckoo Search Algorithm(CSA)
4. MATLAB
5. Servo Motor
6. Online
7. Fuzzy Logic
8. Imperialism Competitive Algorithm (ICA)
9. Artificial bee colony (ABC)
10. Differential Evolution (DF)
11. Cost Of Energy (CEO)
12. Genetic Algorithm-Particle Swarm Optimization (GA-PSO)
13. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)

14. Chaotic Particle Swarm Optimization (CPSO)

## بهبود عملکرد و صرفه‌جویی انرژی با بهینه‌سازی از طریق الگوریتم رقابت استعماری در سیستم ردیاب... ۵

است. در این حالت، ردیاب باید مسیر حرکت خورشید را دنبال نماید، بنابراین قبل از طراحی سیستم، مسیر خورشید باید شناخته شود. بدین منظور باید سیستمی طراحی شود که توانایی چرخش حول دو محور شرق-غرب و شمال-جنوب را داشته باشد.

یک‌محوره و دومحوره ارائه می‌دهد. سرانجام، بخش جمع‌بندی مقاله را به اتمام می‌رساند.

## ۲. طراحی سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره چرخان-خطی

هدف اصلی سیستم ردیابی خورشید دریافت حداکثر توان از محیط



(ب)



(الف)

شکل (۱): (الف) سیستم کنترل، (ب) نمایشی از سیستم دومحوره چرخان-خطی



(ج)



(ب)



(الف)

شکل (۲): (الف) راه‌انداز<sup>۱</sup> موتور DC، (ب) PLC، (ج) سنسور فتولتائیک

### ۳. مدل ساده یک موتور DC

شکل (۴) یک مدل ساده از موتور DC به کار برده شده در سیستم را نشان می‌دهد؛ دینامیک موتور به صورت ایدئال است. با فرض ثابت بودن میدان مغناطیسی، مقاومت مدار متوسط با  $R$ ، اندوکتانس آرمیچر<sup>۶</sup> با  $L$  مشخص شده‌اند. روابط بین پتانسیل الکتریکی و نیروی مکانیکی، قانون القای فارادی، و قانون آمپر برای ایجاد نیرو روی یک هادی در حال حرکت توسط میدان مغناطیسی هستند.

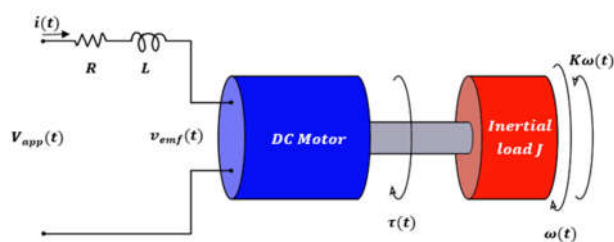
گشتاور  $\tau$  دیده شده در محور موتور با جریان  $i$  در زمان  $t$  ناشی از ولتاژ اعمال شده  $V_{app}$  متناسب است. در نتیجه:

$$\tau(t) = K_m i(t) \quad (۱)$$

که در آن  $K_m$  ثابت است.

نیروی محرکه الکتریکی  $V_{emf}$  متناسب با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  است که بدین صورت به دست می‌آید.

$$V_{emf}(t) = K_b \omega(t) \quad (۲)$$



شکل (۴): مدل ساده موتور DC در حال چرخاندن بار اینرسی [۲۵]

همچنین، ثابت نیرو محرکه الکتریکی است. بخش مکانیکی معادلات موتور با استفاده از قانون نیوتن استخراج شده است. اینرسی بار  $J$ ، در مشتق سرعت زاویه‌ای با مجموع تمام گشتاورهای روی موتور برابر است.

$$J \frac{d\omega}{dt} = \sum \tau_i = -K_f \omega(t) + K_m i(t) \quad (۳)$$

که در آن،  $K_f \omega$  یک تقریب خطی برای گشتاور اصطکاکی می‌باشد. معادلات بخش الکتریکی سیستم به شرح زیر است:

$$V_{app}(t) - V_{emf} = L \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad (۴)$$

$$V_{app}(t) = L \frac{di}{dt} + Ri(t) + K_b \omega(t) \quad (۵)$$

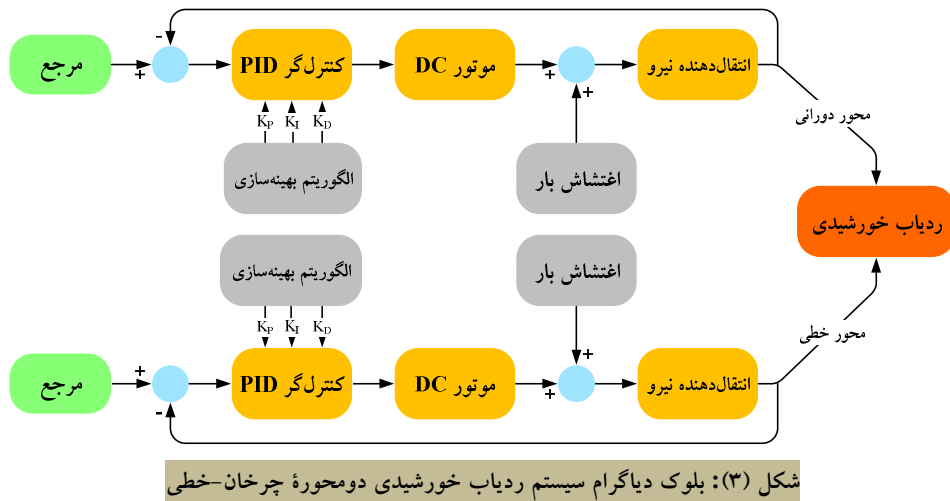
$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) - \frac{K_b}{L} \omega(t) + \frac{1}{L} V_{app}(t) \quad (۶)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{J} K_f i(t) + \frac{1}{J} K_m i(t) \quad (۷)$$

مدل پنل D6P24B3A می‌باشد که در شکل (۱) دیده می‌شود. این پنل قادر است حداکثر ۲۴۰ وات توان تولید کند. از دو موتور کم‌مصرف دارای گیربکس<sup>۱</sup> به منظور چرخش ۳۶۰ درجه و حرکت خطی ۱۸۰ درجه که قادر به پوشش نیم‌کره کامل باشد، تشکیل شده است. محور دورانی و خطی در این ردیاب، به ترتیب زاویه آزیموت<sup>۲</sup> و تیلت<sup>۳</sup> را تنظیم می‌کنند. در اقلیم آب‌وهوایی مختلف، سیستم از طلوع تا غروب به دنبال ردیابی حداکثر تشعشعات خورشیدی از محیط است؛ به همین دلیل برای مثال توان دریافتی با اغتشاش به وجود آمده در هوای نیمه‌ابری نیز به حداکثر خواهد رسید. در این حالت، به وضوح دیده می‌شود که پنل ممکن است دقیقاً روبه‌روی خورشید قرار نگیرد. این دستگاه توسط کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر<sup>۴</sup> و یک درایور قدرتمند به صوت آنی کنترل می‌شود.

پارامترهای کنترل‌کننده PID ابتدا در نرم‌افزار متلب با استفاده از مدل طراحی و تنظیم شده است و با توجه به اینکه کنترل‌کننده به سیستم عملی اعمال می‌شود و سرعت ردیابی بسیار مورد اهمیت است، پس از شبیه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی در متلب نتایج حاصل در نرم‌افزار لَب‌ویو<sup>۵</sup> که عامل ارتباط بین PLC و سیستم است، پیاده‌سازی می‌شود و PLC دستور حرکت موتور را صادر می‌کند. PLC مورد استفاده در شکل (۲) از نوع DELTA PLC است که کارت آنالوگ-DVP 06ADS نیز برای اندازه‌گیری دقیق‌تر به آن اضافه شده است. برای اتصال به موتورهای و کنترل آن‌ها از راه‌انداز (Sabertooth 2x12) استفاده شده است. سنسورها در چهار طرف پنل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح اصلی پنل مطابق شکل (۲) نصب شده‌اند. بر طبق شکل (۳)، انحراف از زاویه دقیق روبه‌روی خورشید با این چهار سنسور تشخیص داده می‌شود. ولتاژ این سنسورها از طریق PLC به کامپیوتر انتقال داده شده و انحراف از زاویه دقیق موجب اختلاف ولتاژ بین سنسورها می‌شود. این اختلاف محاسبه شده و فرمان کاهش زاویه انحراف از طریق کامپیوتر به PLC و سپس به راه‌انداز موتورها داده می‌شود. موتورها به مقدار لازم بر طبق فرمان داده‌شده حرکت نموده و پنل را از طریق سیستم دورانی و خطی به سمت خورشید سوق می‌دهند. بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی منجر به سرعت ردیابی بیشتر و کاهش انرژی مصرفی موتورها می‌شود. بنابراین، الگوریتم بهینه‌سازی که بتواند عملکرد سیستم را بیشتر بهبود بخشد، حائز اهمیت است. در بخش‌های بعدی مدل مربوط آورده شده و سپس مقایسه بین الگوریتم‌های مختلف صورت می‌گیرد.

1. Gearbox
2. Azimuth
3. Tilt
4. Programmable Logic Controller
5. LabVIEW



الگوریتم‌های تکاملی با یک جمعیت تصادفی اولیه آغاز می‌شود و هریک از اعضای این جمعیت یک کشور نامیده می‌شود. بعضی از بهترین اعضا، امپریالیست<sup>۱</sup> و دیگران مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. امپریالیست‌ها با روش خاص، کلونی<sup>۲</sup> یا مستعمره جذب می‌کنند [۲۷].

#### ۲.۴. شکل‌گیری امپراطوری اول

در یک مسئله بهینه‌سازی، هدف اصلی یافتن بهترین پاسخ بهینه برای مسئله مورد نظر است. بدین منظور با مجموعه‌ای از متغیرهای بهینه‌سازی شده شکل می‌گیرد. یک مسئله بهینه‌سازی  $N_{var}$  بعد دارد و هر کشور از نظر ویژگی‌های تاریخی فرهنگی و اجتماعی سیاسی مانند فرهنگ و زبان شکل می‌گیرد [۲۷].

$$Contery = [p_1, p_2, \dots, p_{n_{var}}] \quad (11)$$

#### ۳.۴. تشکیل کشورها

شروع روند بهینه‌سازی با تعدادی کشور تشکیل می‌شود. قوی‌ترین کشورها به‌عنوان امپریالیست انتخاب می‌شوند. منظور از قوی‌ترین در الگوریتم، کشورهایی با هزینه کمترند. کشورهای باقی‌مانده به‌عنوان مستعمره یا کلونی امپراطوری‌ها هستند [۲۷].

#### ۴.۴. سیاست جذب

در سیاست جذب مستعمرات به‌سمت امپریالیست‌ها در امتداد محور  $X$  حرکت می‌کنند و در موقعیت جدید قرار می‌گیرند.  $X$  عدد تصادفی متغیر با توزیع یکنواخت است.

$$X \square U(0, \beta * d) \quad (12)$$

که  $\beta$  یک عدد با مقدار بزرگ‌تر از ۱ و نزدیک ۲ است. همچنین،  $d$  فاصله میان استعمارگر و مستعمره است [۲۷].

معادلات فضای حالت برای موتور DC با توجه به دو معادله (۶) و (۷) حاصل می‌شود و جریان  $i$  و سرعت زاویه‌ای  $\omega$  دو متغیر حالت سیستم هستند، و لذا اعمال شده ورودی سیستم و سرعت زاویه‌ای  $\omega$  خروجی سیستم است.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{K_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_{app} \quad (8)$$

$$y(t) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + [0] V_{app}(t) \quad (9)$$

تابع تبدیل موتور DC را در نهایت می‌توان از فضای حالت به‌صورت زیر به دست آورد [۲۶].

$$P(s) = \frac{K_m}{LJs^2 + (RJ + LK_f)s + (RK_f + K_m K_b)} \quad (10)$$

#### ۴. الگوریتم بهینه‌سازی

در این مقاله، به‌منظور کنترل کارآمدتر سیستم ردياب خورشیدی دوماحوره چرخان-خطی از الگوریتم‌های ژنتیک، زنبور عسل، بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی و رقابت استعماری برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID استفاده شده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی این الگوریتم‌ها و عملکرد سیستم با بهینه‌سازی ضرایب کنترلی توسط آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. ضمن اینکه برای عملکرد سیستم سه مشخصه مهم زمان نشست، فراجش و بازه اطمینان پایداری (فاصله آخرین قطب حلقه بسته تا محور موهومی) در نظر گرفته شده است.

#### ۱.۴. الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری با توجه به سرعت و دقت بالا در سال‌های اخیر در بین محققان، محبوبیت زیادی به دست آورده است. مانند سایر

#### ۵.۴. تحول

تحول از به دام افتادن الگوریتم در مینیمم محلی جلوگیری می‌کند. در بعضی موارد موقعیت کشورهای مستعمره را بهبود می‌بخشد و آن را به سمت ناحیه بهینه بهتر می‌کشانند [۲۷].

#### ۶.۴. مبادله امپریالیست‌ها و مستعمرات

در طی حرکت مستعمرات به سوی کشور امپریالیستی، بعضی از این مستعمرات ممکن است به موقعیتی بهتر و هزینه کمتر نسبت به امپریالیست‌ها دست یابند. در روند تغییر موقعیت امپریالیست و قلمرو، الگوریتم با امپریالیست جدید ادامه پیدا خواهد کرد [۲۷].

#### ۷.۴. رقابت امپریالیستی

امپراتوری‌ها هریک بر اساس قدرتی که دارند، مستعمره جذب می‌کنند. امپریالیستی که قادر به افزایش قدرتش نیست، قدرت رقابتی خود را از دست می‌دهد و در رقابت با سایر امپریالیسم‌ها سقوط خواهد کرد. هنگامی که یک امپریالیست فرومی‌ریزد، مستعمرات آن در میان امپریالیست‌های دیگر تقسیم می‌شوند [۲۷]. در ادامه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی آورده خواهد شد.

#### ۸.۴. نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی

برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده توسط الگوریتم بهینه‌سازی ابتدا باید یک تابع هدف برای الگوریتم تعریف شود. تابع هدف در این مقاله دو مشخصه عملکرد پاسخ تابع پله سیستم مانند زمان نشست و فرجهش را کاهش می‌دهد. همچنین، برای پایداری تمامی قطب‌های حلقه بسته سیستم باید در سمت چپ محور موهومی قرار گیرند و نزدیک‌ترین قطب به محور موهومی اساساً شاخصی از پایداری سیستم می‌باشد؛ معکوس جزء حقیقی نزدیک‌ترین قطب به محور موهومی به‌عنوان شاخص پایداری<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تابع هزینه به صورت مجموع وزن‌دار از این شاخص‌ها تعریف می‌شود.

$$\text{Cost Function} = W_1 * MP + W_2 * TS + W_3 * ST \quad (13)$$

که  $W_1$ ،  $W_2$ ،  $W_3$  به ترتیب ضریب و اهمیت فرجهش، زمان نشست و معیار پایداری سیستم است. سه مؤلفه  $MP$  (فرجهش) و  $TS$  (زمان نشست سیستم) و  $ST$  (اندیس پایداری سیستم) در تابع فوق استفاده می‌شوند که اندیس پایداری سیستم عکس جزء حقیقی نزدیک‌ترین قطب به محور موهومی است. به عبارت دیگر، تابع هدف از سه جزء تشکیل شده: دو جزء آن یعنی فرجهش و زمان نشست مربوط به پاسخ پله است، اما جزء سوم آن یعنی اندیس پایداری بر اساس معکوس کمترین فاصله نزدیک‌ترین قطب تا محور موهومی (معکوس

جزء حقیقی نزدیک‌ترین قطب تا محور موهومی) است.

از آنجا که تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده با سعی و خطا بسیار مشکل و زمان‌بر است، این پارامترها با چهار الگوریتم بهینه‌سازی مطابق جدول (۱) با استفاده از محیط متلب طراحی و تنظیم شد.

جدول (۱): تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID با الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی	$K_P$	$K_I$	$K_D$
ژنتیک	۳۷,۷۶۲۴	۵,۵۶۴۷	۷,۶۰۹۶
زنبور عمل	۲۱,۱۵۲۸	۹,۰۵۹۴	۴,۶۲۲۷
ازدحام ذرات آشوبی	۲۲,۶۴۸۴	۱۳,۲۵۷۹	۵,۸۳۸۶
رقابت استعماری	۱۹,۷۹۵۹	۷,۱۷۶۳	۱,۶۳۹۵

با توجه به اینکه کنترل‌کننده به سیستم عملی اعمال می‌شود و سرعت ردیابی بسیار مورد اهمیت است، پس از شبیه‌سازی الگوریتم‌های تکاملی در متلب نتایج حاصل در نرم‌افزار لَب‌ویو که عامل ارتباط بین PLC و سیستم است، مطابق شکل (۵) پیاده‌سازی شده و PLC دستور حرکت موتور را صادر می‌کند. انواع الگوریتم‌های تکاملی مورد آزمایش قرار گرفته و از بین الگوریتم‌ها الگوریتم رقابت استعماری از لحاظ افزایش سرعت ردیابی سیستم، عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. برای تابع هدف زمان خاصی برای انجام شبیه‌سازی مد نظر نیست؛ زیرا ممکن است زمان نشست، فرجهش و پایداری سیستم در بازه زمانی خاصی قرار نگیرد. مقادیر پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی و الگوریتم رقابت استعماری در جدول (۲) آورده شده است. نتایج حاصل شده در جدول (۳) برتری الگوریتم رقابت استعماری را از لحاظ کاهش فرجهش، زمان نشست، و پایداری قطب‌های حلقه بسته نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.

#### ۵. نتایج عملی

در این بخش، ابتدا روند کنترلی سیستم و چگونگی انتقال ولتاژ سنسورها به PLC، پردازش اطلاعات در کامپیوتر و چگونگی فرمان حرکت موتورها با توجه به ولتاژ دریافتی از سنسورها آورده شده است. سپس، نتایج ردیابی با دو کنترل‌کننده P و PID بهینه شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک، زنبور عمل، ازدحام ذرات آشوبی و رقابت استعماری مطابق جدول (۴) آورده شده است. مقایسه از لحاظ سرعت ردیابی بین عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی و الگوریتم رقابت استعماری در جدول (۵) صورت گرفته است. با توجه به برتری الگوریتم رقابت استعماری نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد بررسی، نتایج ردیابی با طراحی بهینه کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم رقابت استعماری آورده شده و مقایسه انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی با دو روش کنترلی P و PID بهینه‌شده با الگوریتم‌های مذکور صورت گرفته است.

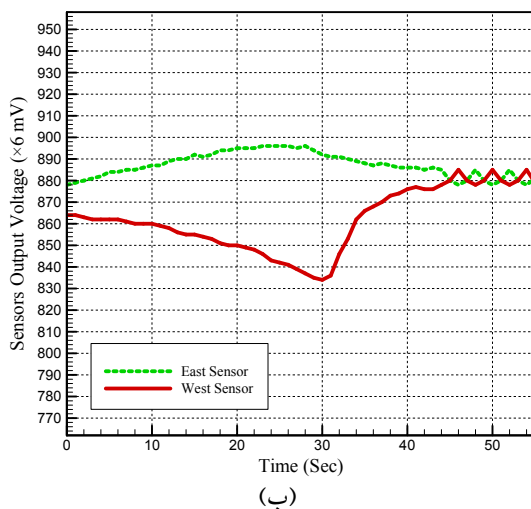
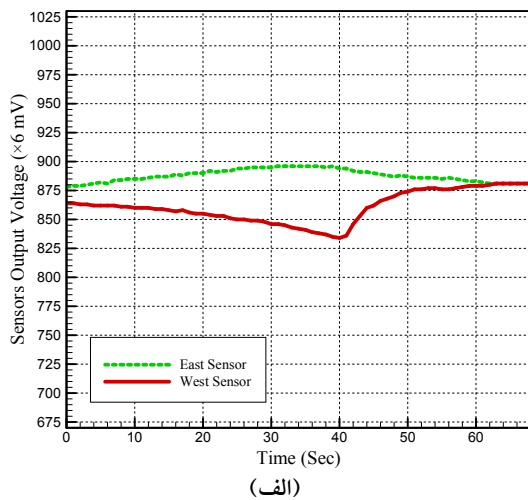
#### 1. Maxreal Pole

## ۲.۵. نتایج برای سیستم ردیابی دوماحوره با اعمال کنترل‌کننده تناسبی (P)

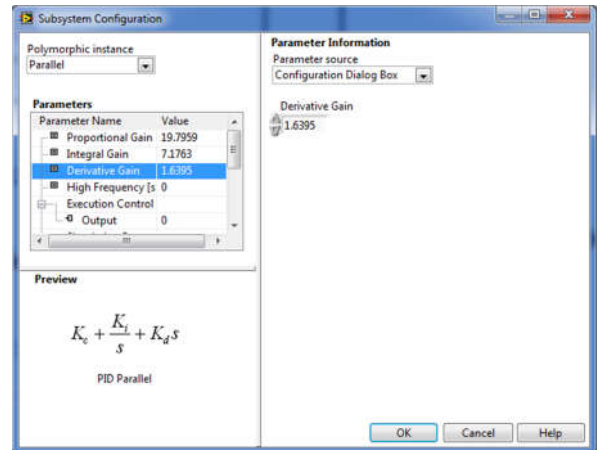
در ابتدا ردیابی به‌ازای فقط کنترل‌کننده تناسبی بررسی می‌شود. جدول (۳) اطلاعات سنسورهای شرق و غرب، در بهره‌های مختلف را نشان می‌دهد. منظور از زمان ردیابی از دورترین موقعیت، بیشترین اختلاف موقعیت کنونی خورشید در شرق نسبت به زمانی که پنل به سمت غرب چرخیده است. همان‌طور که مشخص است، بهترین بهره برای سیستم ۵ می‌باشد. در بهره‌های پایین‌تر سرعت سیستم کندتر و همچنین در بهره‌های بالاتر سیستم نوسانی می‌گردد و قادر به ردیابی نیست.

جدول (۴): مقایسه بهره‌ها متفاوت کنترل‌کننده P اعمالی بر سیستم

زمان ردیابی از دورترین موقعیت	بهره کنترل‌کننده تناسبی P
۸۶ ثانیه	$P=3$
۷۲ ثانیه	$P=4$
۵۸ ثانیه	$P=5$
ناپایدار	$P=6$



شکل (۷): (الف) ولتاژ سنسور شرق و غرب در  $P=5$ ، (ب) ولتاژ سنسور شرق و غرب در  $P=6$



شکل (۵): تنظیمات کنترل‌کننده PID با الگوریتم رقابت استعماری

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات آشوبی و الگوریتم رقابت استعماری

رقابت استعماری [۲۶]	ازدحام ذرات آشوبی [۲۸]
جمعیت اولیه: ۱۰۰	جمعیت اولیه: ۱۰۰
ماکزیمم تعداد تکرار: ۱۰۰	ماکزیمم تعداد تکرار: ۱۰۰
$\beta = 2$	ضریب تجربه شخصی: $C_1 = 1/5$
$\zeta = 0/1$	ضریب تجربه گروهی: $C_2 = 2$
ضریب تحول: ۰/۱	ضریب اینرسی: $W = 0/9$

جدول (۳): مقادیر پاسخ پله سیستم حلقه بسته ردیاب خورشیدی دوماحوره چرخان-خطی

الگوریتم بهینه‌سازی	MP	TS	ST	Maxreal pole
ژنتیک	۱,۳۰۶۴	۰,۶۳۲۶	۰,۶۵۳۱	۱,۵۳۱۱
زنبور عمل	۰,۹۰۲۳	۰,۷۸۵۸	۰,۷۸۶۱	۱,۲۷۲۵
ازدحام ذرات آشوبی	۰,۳۶۶۹	۰,۸۳۵۷	۲,۲۲۸۷	۰,۴۴۸۶
رقابت استعماری	۰,۲۰۵۶	۰,۳۱۳۶	۲,۶۵۷۵	۰,۳۷۶۲

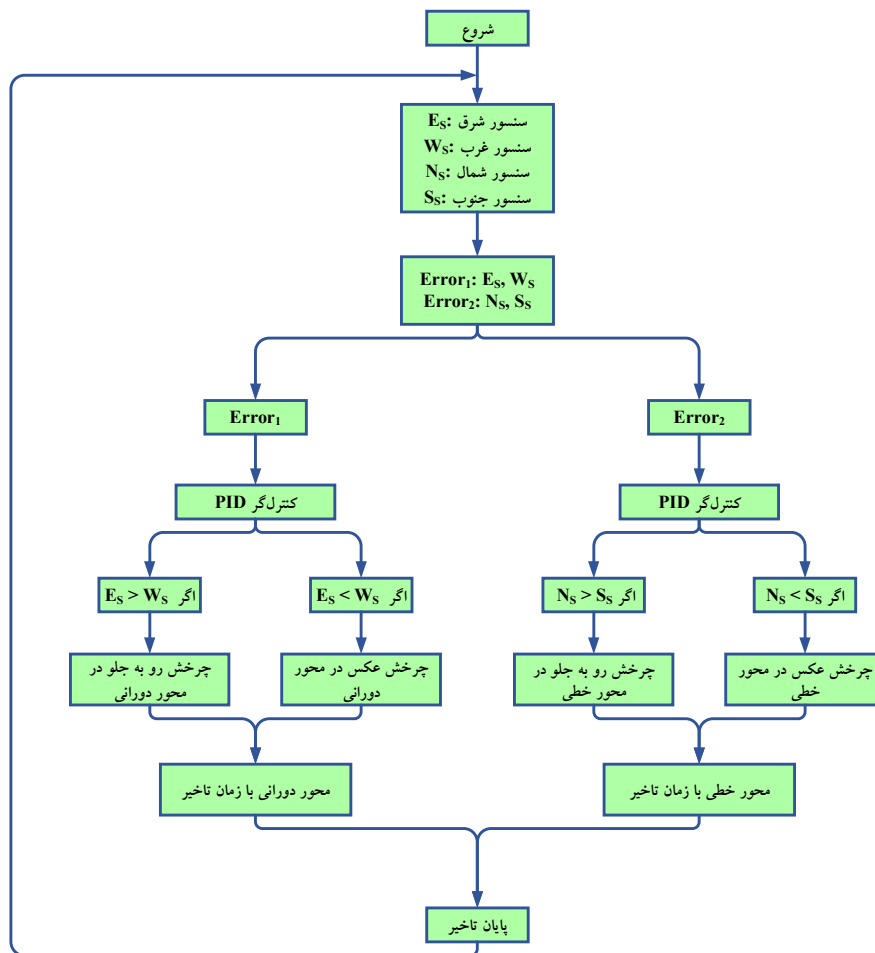
## ۱.۵. الگوریتم کنترلی سیستم

شکل (۶) الگوریتم کنترلی بر اساس اختلاف بین ولتاژ دریافتی سنسورهاست؛ به‌گونه‌ای که ولتاژ دریافتی سنسورهای شرق و غرب با یکدیگر و سنسور شمال و جنوب پنل با یکدیگر مقایسه شده و به‌واسطه درگاه ورودی آنالوگ PLC به کامپیوتر انتقال داده و سرانجام توسط نرم‌افزار رابط به لب‌ویو انتقال داده می‌شود. پس از انتقال ولتاژ سنسورها توسط کنترل‌کننده PID مورد کنترل قرار خواهند گرفت و با دادن برنامه‌ای موتورها به سمت نقطه مورد نظر حرکت می‌کنند.  $E_s$ ،  $N_s$ ،  $W_s$  و  $S_s$  به ترتیب نشان‌دهنده سنسورهای شرق، غرب، شمال و جنوب هستند.  $Error_1$  نشان‌دهنده اختلاف ولتاژ سنسور شرق و غرب و  $Error_2$  نشان‌دهنده اختلاف ولتاژ سنسور شمال و جنوب است.



پذیرفته با افزایش بهره، سیستم نوسان می‌کند. برای سنسورهای شمال و جنوب نیز اتفاق مشابه می‌افتد.

شکل (۷) قسمت (الف) و (ب) به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ سنسورهای شرق و غرب با بهره‌های  $P=5$  و  $P=6$  هستند. در بهترین حالت ردیابی با کنترل‌کننده  $P=5$  در مدت زمان ۵۸ ثانیه صورت



شکل (۶): طرح‌واره کنترلی سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره چرخان-خطی

جدول (۵): مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر پارامترهای

کنترل‌کننده PID اعمالی بر سیستم

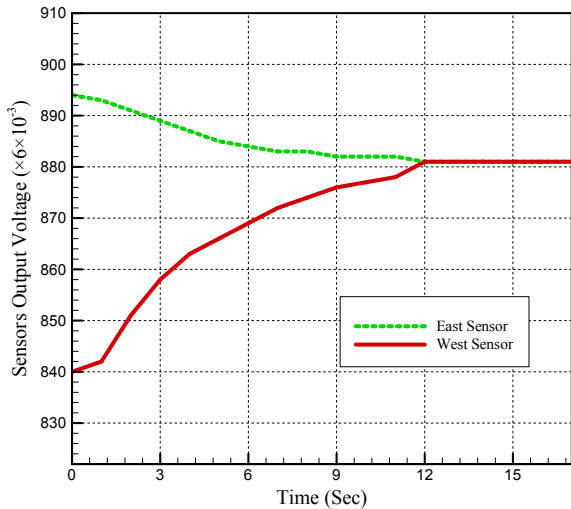
الگوریتم بهینه‌سازی	ضرایب بهینه‌سازی شده	زمان ردیابی از دورترین موقعیت
ژنتیک	$K_P=37,7624$ $K_I=21,1528$ $K_D=19,7959$	۴۸ ثانیه
زنبور عسل	$K_P=21,1528$ $K_I=13,2579$ $K_D=5,8386$	۴۲ ثانیه
ازدحام ذرات آشوبی	$K_P=22,6484$ $K_I=9,0594$ $K_D=4,6227$	۳۶ ثانیه
رقابت استعماری	$K_P=19,7959$ $K_I=7,1763$ $K_D=1,6395$	۲۷ ثانیه

۳.۵ نتایج برای ردیابی سیستم دومحوره با اعمال

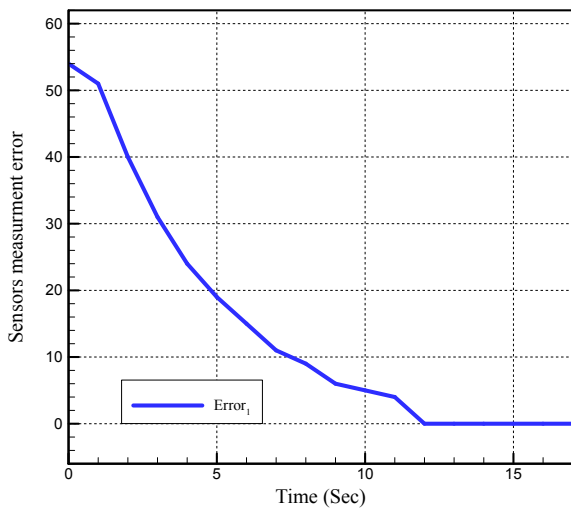
کنترل‌کننده PID

در این قسمت، ردیابی دومحوره چرخان-خطی با ضرایب بهینه‌سازی شده بررسی می‌گردد. جدول (۵) مدت‌زمان ردیابی سیستم بهینه‌شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی از دورترین موقعیت، بیشترین اختلاف موقعیت کنونی خورشید در شرق نسبت به زمانی که پنل به سمت غرب چرخیده را نشان می‌دهد. نتایج، برتری الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری را در کاهش مدت‌زمان ردیابی نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد.

برای دید بهتر، شکل (۹) برشی از شکل (۸) را از ثانیه ۱۵ تا ۲۷ نشان می‌دهد. شکل (۹-الف) نشان‌دهنده ولتاژ خروجی سنسور شرق و غرب می‌باشد که در آن سنسور شرق در لحظه اول، نور بیشتری دریافت کرده است. در این حالت، موتور حرکت نموده و اختلاف سنسور شرق نسبت به سنسور غرب در مدت ۱۲ ثانیه به صفر میل می‌کند. شکل (۹-ب) نیز اختلاف دو سنسور را برای ردیابی نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

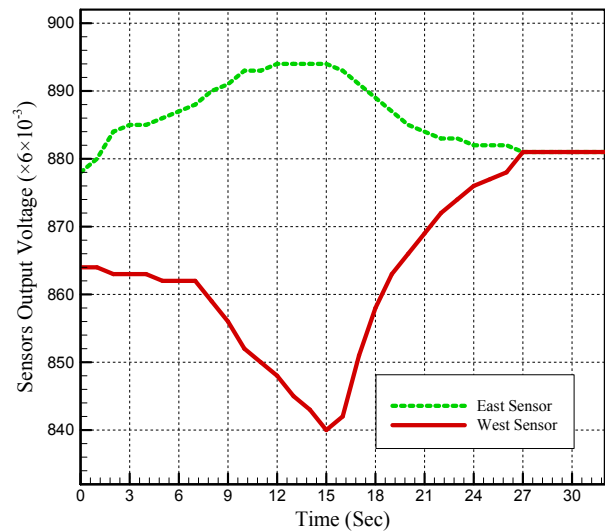
شکل (۹): (الف) ولتاژ سنسور شرق و غرب، (ب) اختلاف ولتاژ سنسور شرق و غرب

شکل (۱۰ الف و ب) به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ خروجی سنسور شمال (North Sensor) و جنوب (South Sensor) و اختلاف آن‌هاست که در دورترین وضعیت می‌باشد. همان‌طور که در این نمودار مشهود می‌باشد، زمان ردیابی سنسورهای شمال و جنوب با سنسور شرق و غرب مشابه است و در مدت ۲۷ ثانیه با سرعت بسیار مناسبی ردیابی صورت گرفته است.

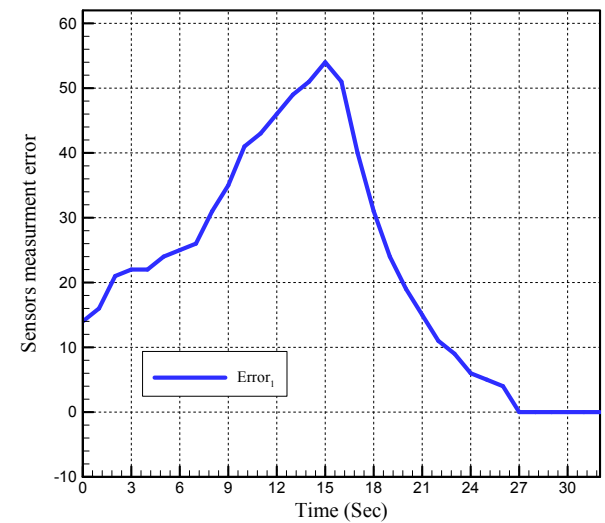
#### ۴.۵. نتایج ردیابی سیستم دومحوره با اعمال کنترل‌کننده

##### PID با الگوریتم رقابت استعماری

شکل (۸-الف) نشان‌دهنده ولتاژ خروجی سنسورهای شرق و غرب و نیز شکل (۸-ب) نشان‌دهنده اختلاف بین ولتاژهای (Error) سنسورهای شرق (East Sensor) و غرب (West Sensor) از دورترین موقعیت مکانی دستگاه تا ردیابی کامل خورشید می‌باشد که تنها در مدت ۲۷ ثانیه صورت گرفته است. همان‌طور که مشهود است، سنسور شرق نور بیشتری دریافت کرده و موتورها را به آن سمت هدایت می‌کند تا ولتاژ دو سنسور با هم برابر شوند، آنگاه مرکز پنل اصلی در روبه‌روی بیشترین تشعشعات خورشیدی قرار خواهد گرفت. اختلاف ولتاژ ابتدا زیاد و سپس کم خواهد شد. در این حالت، اختلاف دو سنسور به حداقل رسیده تا ردیابی به صورت دقیق انجام پذیرد.

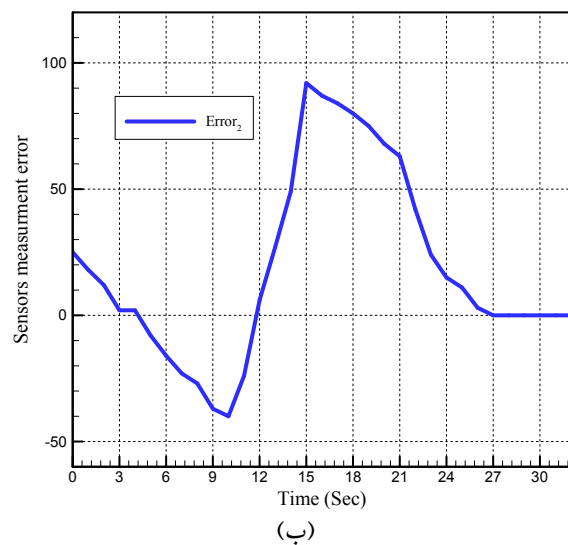
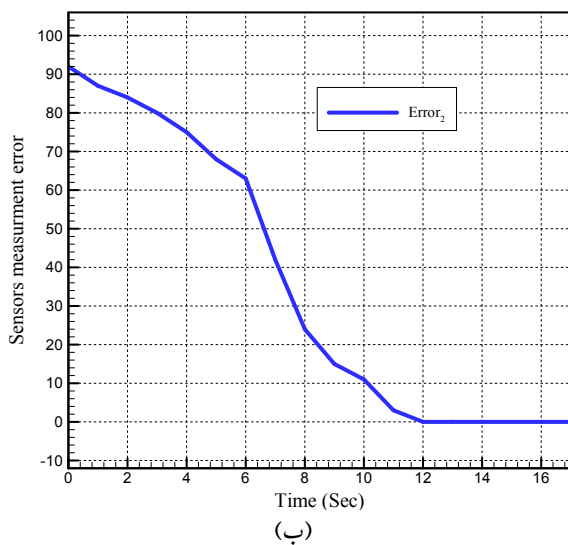
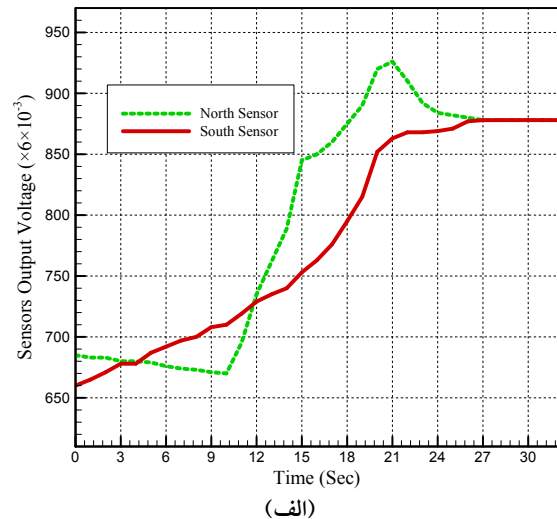
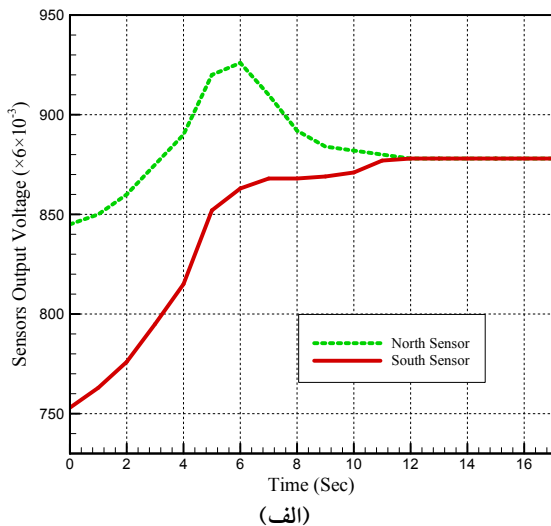


(الف)



(ب)

شکل (۸): (الف) ولتاژ سنسور شرق و غرب، (ب) اختلاف ولتاژ سنسور شرق و غرب



شکل (۱۱): (الف) ولتاژ سنسور شمال و جنوب، (ب) اختلاف ولتاژ سنسور شمال و جنوب

شکل (۱۰): (الف) ولتاژ سنسور شمال و جنوب، (ب) اختلاف ولتاژ سنسور شمال و جنوب

۵.۵. بررسی توان دریافتی سیستم بهینه شده با الگوریتم رقابت استعماری در حالت ثابت، یک محوره و دومحوره تأثیر نور خورشید با توجه به زمان و موقعیت جغرافیایی تغییر می کند. در این مقاله، توان دریافتی از پنل در حالت ثابت، یک محوره و دومحوره بهینه شده محاسبه گردیده و نتایج به عنوان نمونه در دو روز آفتابی و نیمه ابری به دست آمده است.

آزمایش در طول ۱۰ و نیم ساعت از روز حاصل شده است. بهترین زاویه شیب سیستم در حالت ثابت با توجه به موقعیت منطقه، عرض جغرافیایی، تاریخ و زمان تعیین شده است (۳۰ درجه). در ادامه، شکل (۱۲) دریافت توان را در هر سه حالت ثابت، تک محوره و دومحوره در روز آفتابی نشان می دهد. از آنجا که سیستم دومحوره به طور مداوم خورشید را در هر دو محور ردیابی می کند، توان تولیدی از پنل نسبت

در اینجا نیز برای دید بهتر، برشی از شکل (۱۰) از ثانیه ۱۵ تا ۲۷ در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۱-الف) نشان دهنده ولتاژ خروجی سنسور شمال و جنوب است. در این حالت، موتور حرکت کرده و اختلاف سنسور شمال نسبت به سنسور جنوب در مدت ۱۲ ثانیه به صفر میل می کند. شکل (۱۱-ب) نیز اختلاف دو سنسور برای ردیابی را نشان می دهد.

## ۶.۵. مقایسه انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی با دو روش کنترلی P و PID بهینه‌شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی

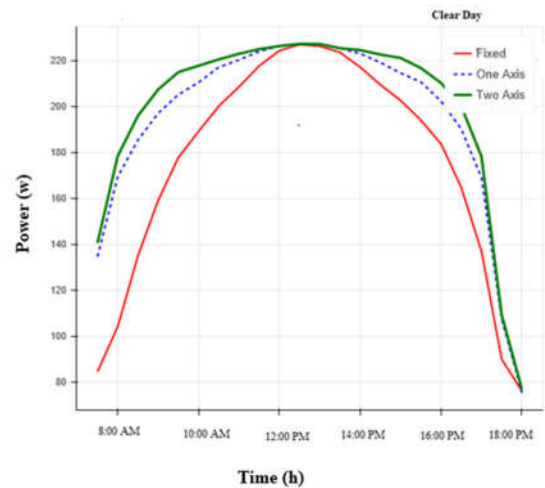
با انجام آزمایشات در چندین مرحله و برای روزهای متوالی، جدول (۶) انرژی مصرفی موتورها را با ضرایب بهینه‌سازی شده کنترل‌کننده‌های P و PID توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، تعیین پارامترهای کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم رقابت استعماری، کاهش انرژی مصرفی موتورها را در هر دو حالت یک‌محوره و دومحوره نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد. انرژی تولیدی سیستم یک‌محوره و دومحوره نسبت به حالت ثابت به ترتیب ۳۰٪ و ۴۳٪ افزایش داشته است. در این جدول، در ستون (۱) مقایسه بین کنترل‌کننده P با بهره ۵ (که بهترین بهره اعمالی از لحاظ سرعت ردیابی بوده) و بین چهار الگوریتم تنظیم‌کننده پارامترها صورت گرفته است. الگوریتم رقابت استعماری از لحاظ توان مصرفی موتورها مطابق ستون (۲) با مقدار ۴,۳۸ وات کمترین توان مصرفی موتورها را داشته که نسبت به توان دریافتی بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. و مطابق ستون (۳) دریافت توان از پنل با یک محور متحرک نسبت به ثابت الگوریتم رقابت استعماری افزایش ۳۰٪ را نشان داده است که نسبت به سایر الگوریتم‌ها بیشتر است. همچنین، مطابق ستون (۴) دریافت توان از سیستم با دومحوره متحرک نسبت به حالت ثابت الگوریتم رقابت استعماری افزایش ۴۳٪ را نشان می‌دهد که نسبت به سایر الگوریتم‌ها به همین ترتیب بیشتر است. به عبارت دیگر، سیستم بهینه با دومحوره متحرک الگوریتم رقابت استعماری به‌طور متوسط ۱۰۳,۲ وات توان بیشتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها تولید کرده است.

جدول (۶): مقایسه انرژی مصرفی موتورها و توان تولیدی با دو روش کنترلی P و PID بهینه‌شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی

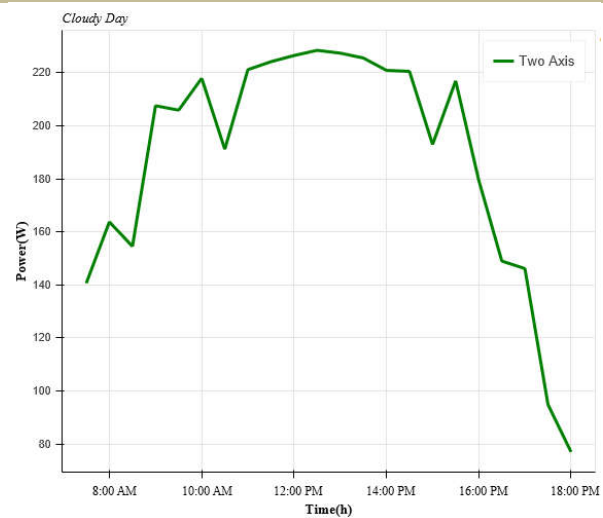
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)
$P=5$	۶,۰۳ Wh	٪۲۰	٪۳۴,۹	۸۳,۷۶ Wh
ژنتیک	۵,۵ Wh	٪۲۳	٪۳۸	۹۲,۲ Wh
زنیور غسل	۵,۱۸ Wh	٪۲۵/۹	٪۴۰,۸	۹۷,۹۲ Wh
ازدحام ذرات آشوبی	۴,۸۶ Wh	٪۲۷/۲	٪۴۲,۳	۱۰۱,۵۲ Wh
رقابت استعماری	۴,۳۸ Wh	٪۳۰	٪۴۳	۱۰۳,۲ Wh

مطابق جدول (۷)، هزینه قطعات به‌کار برده‌شده در سیستم مشخص گردیده است.

به حالت یک‌محوره نیز افزایش می‌یابد. در این حالت حداکثر توان تولیدی از پنل حاصل می‌شود. مطابق شکل (۱۲) در ساعات اولیه صبح و اواخر ساعت‌های شب، تفاوت بین سه حالت افزایش می‌یابد. در هنگام ظهر، تفاوت مشهودی بین سه حالت دیده نمی‌شود. بین ساعات ۱۳:۳۰ تا ۱۷:۳۰ و ۱۵:۳۰ تا ۱۳:۳۰ مقدار توان دریافتی حالت دومحوره بیشتر از حالت ثابت است. مقادیر توان در ساعات ۱۱ تا ۱۳ تقریباً مشابه است. در بین ساعات ۱۷:۳۰ تا ۱۳:۳۰ توان در دومحوره افزایش می‌یابد. شکل (۱۳) نتیجه را برای روز مشابه اما نیمه‌ابری نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، انرژی دریافتی برای روز نیمه‌ابری در بعضی ساعات کمتر از روز آفتابی است. مقدار تابش خورشید در هر دو حالت به دلیل اغتشاش ابر کم شده، اما در نهایت سیستم با رفع اغتشاش توانسته است به حداکثر توان ممکن ردیابی کند.



شکل (۱۲): بررسی توان دریافتی سیستم در یک روز آفتابی برای حالت ثابت، یک‌محوره، دومحوره



شکل (۱۳): بررسی توان دریافتی سیستم در یک روز نیمه‌ابری برای حالت دومحوره

جدول (۷): هزینه‌های قطعات به کار برده شده در سیستم

قطعه	هزینه‌ها (ریال)
تابلو کنترلی (PLC DELTA)	۱/۵۰۰/۰۰۰
۲ عدد موتور ۲۴V	۱/۲۰۰/۰۰۰
دراپور (Sabertooth 2*12)	۴۰۰/۰۰۰
۴ عدد سنسور از جنس پنل ۵V	۳۲۰/۰۰۰
جمع	۳/۴۲۰/۰۰۰

داشته است، سیستم دومحوره باید ۱۳۲/۳ روز دیگر کار کند تا جمع سود آن به سیستم ثابت برسد و پس از آن هر روز ۵۵۳۶ ریال بیشتر سود خواهد داشت.

شایان ذکر است محاسبات بر اساس نرخ سال ۱۳۹۵ و برای پانل کوچک آزمایشگاهی صورت پذیرفته و مسلم است که در سطح وسیع سوددهی بیشتر خواهد بود.

## ۶. جمع‌بندی

در این مقاله، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای به دست آوردن ضرایب کنترلی سیستم ردیابی دومحوره چرخان خطی استفاده شده است. پارامترهای کنترل‌کننده PID با چهار الگوریتم ژنتیک، زنبور عسل، ازدحام ذرات آشوبی و الگوریتم رقابت استعماری تنظیم و بهینه‌سازی شده است. نتایج عملی شامل سرعت ردیابی، توان تولیدی، انرژی مصرفی موتورها با به کارگیری ضرایب بهینه‌سازی شده، کنترل‌کننده‌های P و PID بهینه‌شده توسط این چهار الگوریتم در جداول و نمودارهایی نشان داده شد. نتایج نشان می‌دهد که سیستم با به کارگیری الگوریتم رقابت استعماری عملکرد بهتری داشته است. با توجه به مقایسه صورت گرفته در سه حالت ثابت، یک‌محوره و دومحوره، سیستم ردیابی دومحوره چرخان خطی با الگوریتم رقابت استعماری حتی نسبت به الگوریتم‌های دیگر نیز عملکرد بهتری داشته است.

در شهر رفسنجان، مدت زمان تابش خورشید در یک روز نمونه ۱۴ ساعت و برای یک پنل ثابت مدت مؤثر تابش ۷ ساعت در روز است. با توجه به اینکه هزینه پانل ۵۸۰۰۰۰۰ ریال و نرخ خرید انرژی خورشیدی توسط شرکت برق ۸۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد، برای جبران هزینه پنل نیاز است ۷۲۵ کیلووات ساعت برق تولید شود. پنل ثابت به طور متوسط در روز ۱/۶۸ کیلووات ساعت انرژی تولید می‌کند و این بدان معنی است که بازگشت سرمایه پس از ۴۳۱/۵ روز انجام می‌شود. سیستم ردیاب دومحوره طبق جدول (۷) مبلغ ۳۴۲۰۰۰۰ ریال بیشتر هزینه دارد و با توجه به تولید ۲/۳۷۲ کیلووات ساعتی آن در روز (۲۳٪ بیشتر تولید می‌کند که مقداری به مصرف موتورها می‌رسد)، بازگشت سرمایه در ۴۸۵/۹ روز اتفاق می‌افتد. پس از بازگشت سرمایه سیستم ثابت هر روز ۱۳۴۴۰ ریال و سیستم دومحوره ۱۸۹۷۶ ریال سود خواهند داشت. از آنجا که بازگشت سرمایه در سیستم دومحوره تقریباً ۵۴/۵ روز بیشتر طول می‌کشد و در این مدت سیستم ثابت سوددهی

## مراجع

- [1] Ozlu, S., Dincer, I., "Analysis and Evaluation of a New Solar Energy-based Multi Generation System", International Journal of Energy Research, Vol.40, pp. 1339-1354, 2016.
- [2] Seme, S., Stumberger, G., Vorsic, J., "Maximum Efficiency Trajectories of a Two-axis Sun Tracking System Determined Considering Tracking System Consumption", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.26, pp. 1280-1290, 2011.
- [3] Filomeno, M., Vieira, P., Moura, S., Anibal, T., "Energy Storage System for Self-consumption of Photovoltaic Energy in Residential Zero Energy Buildings", Renewable Energy, Vol.103, pp. 308-320, 2017.
- [4] Zegaoui, A., M., Aillerie, P., Petit, J., P., Sawicki, J., P., Charles, A., Belarbi, W., "Dynamic Behavior of PV Generator Trackers under Irradiation and Temperature Changes", Solar Energy, Vol.85, pp. 2953-2964, 2011.
- [5] Serrano-Lujan, L., Espinosa, N., Abad, J., Urbina, A., "The Greenest Decision on Photovoltaic System Allocation", Renewable Energy, pp. 1348-1356, 2017.
- [6] Carvalho, R., Lacerda Filho, A., Resende Possi, P., Kruckeberg, J., "An Economical, Two Axes Solar Tracking System for Implementation in Brazil", Applied Engineering in Agriculture, Vol. 29, No. 2, pp. 123-128, 2013.
- [7] Yao, Y., Hu, Y., GAO, S., Yang, G., Du, J., "A Multipurpose Dual-axis Solar Tracker with Two Tracking Strategies", Renewable Energy, Vol.72, pp. 88, No. 98, 2014.
- [8] خراسانی، حسین، مسجی، سید مرتضی، «تعیین زاویه شیب بهینه ماهیانه، فصلی، شش‌ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره چهارم، صفحه ۳۸-۴۹، ۱۳۹۲.
- [9] Lazaroïu, C., Longo, M., Roscia, M., Pagano, M., "Comparative Analysis of Fixed and Sun Tracking Low Power PV Systems Considering Energy Consumption", Energy Conversion and Management, Vol.92, pp. 143-148, 2015.

- [10] AliMohamad, A., "Efficiency Improvements of Photovoltaic Panels Using a Sun-tracking System", Applied Energy, Vol. 79, pp. 345-354, 2004.
- [11] Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H., "Cheap Two Axis Sun Following Device", Energy Conversion and Management, Vol. 46, pp. 1179-1192, 2005.
- [12] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, A., Sharifi, K., "A Review of Principle and Sun-tracking Methods for Maximizing Solar Systems Output", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 11800-1818, 2009.
- [13] Fathabadi, H., "Comparative Study between Two Novel Sensorless and Sensor Based Dual-axis Solar Trackers", Solar Energy, Vol. 138, PP. 67-76, 2016.
- [14] Away, Y., Ikhsan, M., "Dual-axis Sun Tracker Sensor Based on Tetrahedron Geometry", Automation in Construction, Vol. 73, pp. 175-183, 2017.
- [15] Abdollahpour, M., Golzarian, M.R., Rohani H., Zarchi, A. "Development of a Machine Vision Dual-axis Solar Tracking System", Solar Energy, Vol. 196, pp. 136-143, 2018.
- [16] Hoffmann, F.M., Molz, R.F., Kothe, J.V., Nara, E.O.B., Tedesco, L.P.C., "Monthly Profile Analysis Based on a Two-axis Solar Tracker Proposal for Photovoltaic Panels", Renewable Energy, Vol. 115, pp. 750-759, 2017.
- [17] Chen, J.H., Yau, H.T., Hung, T.H. "Design and implementation of FPGA-based Taguchi-chaos-PSO sun tracking systems", Mechatronics, Vol. 25, pp. 55-64, 2015.
- [18] Solihin, M.I., Tack L.F., Keen, M.L., "Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO)", Int Conf Adv Sci, Vol. 1, pp.458-61, 2011.
- [19] Sabir, M.M., Tariq, A., "Optimal PID Controller Design Through Swarm Intelligence Algorithms for Sun Tracking System", Applied Mathematics and Computation, Vol. 274, pp. 690-699, 2016.
- [20] Wari, S., "PSO-PID Maximum Power Point Tracking Controller Using Modified Superlift Luo Converter", Energy procedia, Vol. 117, pp. 87-94, 2017.
- [21] Liang, D., Xiyuan, L., Bo, D., Yuanchun, L., "Experimental Investigation on Fuzzy PID Control of Dual Axis Turntable Servo System", Procedia Computer, Vol.131, pp. 531-540, 2018.
- [22] Fathy, A., Rezk, H., "Parameter Estimation of Photovoltaic System Using Imperialist Competitive Algorithm", Renewable Energy, Vol.111, pp. 307-320, 2017.
- [23] Sawle, Y., Gupta, S.C., Bohre A., "Optimal Sizing of Standalone PV/Wind/Biomass Hybrid Energy System Using GA and PSO Optimization", Energy Procedia, Vol.117, pp. 690-698, 2017.
- [24] Maroufmashat, A., Sayedin, F., Sattari, S., "An Imperialist Competitive Algorithm Approach for Multi-Objective Optimization of Direct Coupling Photovoltaic-Electrolyzer Systems", International journal of hydrogen energy, Vol.39, pp. 18743-18757, 2014.
- [25] Bayareh, M., Mohammadi, M., "Multi-objective optimization of a triple shaft gas compressor station using Imperialist Competitive Algorithm", Applied Thermal Engineering, Vol. 109, pp. 384-400, 2016.
- [۲۶] کاظمی‌نژاد، میلاد، جلیلی، صادق، آقابابایی، مجید، «استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات اصلاح‌شده برای تنظیم پارامترهای کنترلر PID»، همایش ملی مهندسی برق و توسعه پایدار با محوریت دستاوردهای نوین در مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی خاوران مشهد، ۱۳۹۲.
- [27] Taher, S.A., Hajiakbari Fini, M., Falahati Aliabad, S., "Fractional Order PID Controller Design for LFC in Electric Power Systems Using Imperialist Competitive Algorithm", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 5, pp.121-135, 2014.
- [28] Rezaee Jordehi, A., "Enhanced Leader Particle Swarm Optimization (ELPSO): An Efficient Algorithm for Parameter Estimation of Photovoltaic (PV) Cells and Modules", Solar Energy, Vol. 159, pp.78-87, 2018.