ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(02):127-138

Experimental Evaluation of the Open-loop Control Method for a Dual-axis Solar Tracker

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Gitifar S[1],
Mirjalili A S[1],
Jamali A[1],
Pirvalizadeh S[1],
Fakhari V[1*]

How to cite this article
Gitifar S, Mirjalili A S, Jamali A, Pirvalizadeh S, Fakhari V. Experimental Evaluation of the Open-loop Control Method for a Dual-axis Solar Tracker. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(02):127-138.

ABSTRACT

These days, societies need for energy increased due to the expansion of societies, industries, and technology. The production of electricity from renewable energy sources such as solar energy, which does not harm the environment and has little pollution, has attracted the attention of many researchers and engineers. This article will present a new plan for the dual polar axis solar tracker, its design and construction in laboratory dimensions, and the experimental evaluation of its performance using the open-loop control method. For this purpose, after examining the advantages and disadvantages of the previous designs, a new and different conceptual design for the tracker is proposed. Among the features of the proposed tracker, we can point out the ability to combine, install and operate quickly and easily, the self-locking feature, and the ability to rotate 360 degrees around both axes. This tracker has no restrictions for use in different geographical areas, including areas near the North or South Pole and in the early and late hours of the day when the direction of the sun's radiation is strongly inclined. In the following, the detailed design of the proposed detector and the presentation of the open-loop control method will be discussed. Finally, by conducting experimental tests, the production power of the proposed detector is evaluated in comparison with a fixed solar panel. Based on the results, the electricity energy produced from the proposed solar tracker is 49% more than the fixed solar panel.

Keywords Solar Tracker, Dual-Axis Polar Tracker, Open-Loop Control, Self-Locking Feature, Design and Fabrication, Experimental Evaluation

[1] Faulty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Room 136, Faulty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Abbaspour Blvd., Hakimieh, Tehran, Iran
v_fakhari@sbu.ac.ir

Article History
Received: July 24, 2022
Accepted: January 01, 2023
ePublished: February 20, 2023

CITATION LINKS

1- statistical review of world energy 2- Radiation potential and solar radiation map in Iran 3- Dynamic simulation of the adaptive sun tracking system used for an electric unmanned ground vehicle 4- Optimization controller for mechatronic sun tracking system to improve performance 5- Design of a Single-Axis Solar Tracker Using LDRs 6- A computer tracking system of solar dish with... .7- Solar energy collector orientation and tracking mode. Solar energy 8- A high precision tracking system based on a hybrid strategy designed for... 9- Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey 10- Computing the solar vector. Solar energy 11- Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. Applied Energy 12- Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuations and maximum energy collection. Automation in Construction 13- Two axes sun tracking system with PLC control. Energy conversion and management 14- Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15- Passive solar tracking system 16- Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for... 17- Novel online sensorless dual-axis sun tracker 18- Naranjo Casas J. Dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems 19- Designing integrated PV facility with dual-axis solar tracking system mounted on the south building face . 20- A dual-axis tracking photovoltaic power plant as an educational tool. International Journal of Electrical Engineering Education 21- Design and Performance Analysis of a Dual Axis Solar Tracker 22- The implementation and analysis of dual axis sun tracker system to increase energy gain of solar photovoltaic 23- A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. 24- A novel open-loop tracking strategy for photovoltaic systems 25- Simulation of a mechatronic dual-axis tracking system for PV panels. InApplied Mechanics and Materials 26- A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design 27- Dual-axis solar tracker with hybrid control and possibility of full rotation 28- Mechanical Engineering Design 29- Fundamentals of machine component design 30- Global Monitoring Laboratory website. 31- Solar energy fundamentals and modeling techniques

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارزیابی تجربی روش کنترلی حلقه باز برای یک ردیاب خورشیدی دومحوره

سیاوش گیتی‌فر[۱]، امیرسامان میرجلیلی[۱]، علی جمالی[۱]، سعید پیرولی‌زاده[۱]، وحید فخاری*[۱]

۱ دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

امروزه با توجه به گسترش جوامع، پیشرفت روزافزون صنایع و تکنولوژی و همچنین افزایش نیاز جوامع به انرژی، تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، که به محیط زیست آسیب نمی‌زند و آلودگی اندکی دارد، موردتوجه بسیاری از محققان و مهندسان قرار گرفته‌است. در این مقاله، به ارائه طرح جدیدی برای ردیاب خورشیدی دومحوره قطبی، طراحی و ساخت آن در ابعاد آزمایشگاهی و ارزیابی تجربی عملکرد آن به روش کنترل حلقه باز پرداخته می‌شود. به این منظور، پس از بررسی مزایا و معایب طرح‌های پیشین، طرح مفهومی جدید و متفاوتی برای ردیاب پیشنهاد می‌شود. از جمله ویژگی-های ردیاب پیشنهادی می‌توان به قابلیت هم‌بندی، نصب و بهره‌برداری سریع و آسان، خاصیت خودقفل‌شوندگی، قابلیت دوران ۳۶۰ درجه حول هر دو محوراشاره نمود. این ردیاب، محدودیتی برای استفاده در نواحی جغرافیایی مختلف از جمله نواحی نزدیک به قطب شمال یا جنوب و در ساعات ابتدایی و انتهایی روز که راستای تشعشع خورشید به شدت مایل است، ندارد. در ادامه، به طراحی جزئی ردیاب پیشنهادی و ارائه روش کنترلی حلقه‌باز پرداخته می‌شود. در نهایت، با انجام آزمون‌های تجربی، توان تولیدی ردیاب پیشنهادی در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج حاصل، انرژی الکتریکی تولیدی بدست آمده از ردیاب خورشیدی پیشنهادی ۴۹ درصد بیش‌تر از صفحه خورشیدی ثابت است.

کلیدواژه‌ها: ردیاب خورشیدی، ردیاب دومحوره قطبی، کنترل حلقه باز، خاصیت خودقفل‌شوندگی، طراحی و ساخت، ارزیابی تجربی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

*نویسنده مسئول: v_fakhari@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به تجدیدناپذیر بودن و آلودگی‌های بسیار سوخت‌های فسیلی، انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی تمیز و تجدیدپذیر توجه بسیاری از محققان و مهندسان را در سراسر دنیا به خود جلب کرده‌است. میزان انرژی خورشیدی مصرفی در دنیا به‌صورت نمایی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ رشد صعودی داشته‌است[1]. ایران به عنوان یکی از کشورهایی که بر روی کمربند خورشیدی قرار دارد، دارای پتانسیل بسیار مناسب برای به‌کارگیری این انرژی است. با توجه به آمار ارائه شده پتانسیل انرژی خورشیدی در ایران از ۲/۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز در شمال کشور و تا ٤/٥کیلووات ساعت بر مترمربع در روز در جنوب کشور متغیر است. درنتیجه ایران با داشتن پتانسیل بالای استفاده و بهره‌وری از انرژی خورشیدی می‌تواند با بهره‌برداری از آن در تولید برق کشور، بخش قابل توجهی از برق مصرفی کشور را تامین کند و حتی دورنمایی جهت صادرات انرژی الکتریکی حاصل از انرژی خورشیدی در بلند مدت برنامه‌ریزی کند[2].

فرایند تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی به‌طور عمده توسط سامانه‌های فوتوولتاییک (Photovoltaics) تخت و سامانه‌های خورشیدی متمرکز (Concentrated solar power) صورت می‌گیرد. توان خروجی تولیدشده توسط این دستگاه‌ها به عوامل مختلفی همچون، تابش خورشیدی و زاویه تابش خورشید با این صفحات بستگی دارد، به‌طوری‌که عمود بودن تابش خورشید بر این صفحات، بیشینه توان الکتریکی را توسط سامانه‌های فوتوولتاییک تولید می‌نماید. ردیاب خورشیدی دستگاهی است که بر پایه مکانیزم‌های مختلف، صفحات فوتوولتاییک را عمود بر تابش خورشید قرار می‌دهد. در حال حاضر اساساً دو نوع ردیاب خورشیدی بر اساس سازوکار حرکت وجود دارد: ردیاب تک‌محوره[3,5] و ردیاب دومحوره[6,9]. ردیاب‌های تک‌محوره، صفحه خورشیدی را حول یک محور از شرق به غرب دوران داده و محور دیگر بر اساس موقعیت جغرافیایی منطقه در یک راستای بهینه قرار می‌گیرد[10]. ژو و همکاران[11] در سال ۲۰۲۰ یک ردیاب تک محوره با ساختار جدید ارائه نمودند که در تمامی نقاط جغرافیایی کره زمین کاربرد دارد و عملکرد آن بر اساس روابط هندسی حاکم بین زمین و خورشید است. وفا بایتن و همکاران[12] در سال ۲۰۱۹ به طراحی و ساخت ردیاب تک محوره‌ای پرداختند که ۳ بار در روز موقعیت را ردیابی می‌کند و حدود ۹۱ تا ۹۴ درصد انرژی را نسبت به ردیاب تک محوره ای که ۳بار در هر ساعت خورشید را ردیابی می‌کند، بیشتر ذخیره می‌کند.

ردیاب‌های خورشیدی براساس روش کنترل، به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. ردیاب‌های فعال به دو دسته تک‌محوره و دومحوره تقسیم می‌شوند. ردیاب‌های دومحوره خود به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: ردیاب‌های دومحوره آزیموت الویشن (Azimuth-elevation) و ردیاب‌های دومحوره قطبی (Tilt-Roll) یا دکنیلیشن-کلاک (Declination-Clock) تقسیم‌بندی می‌شوند[13]. هر دو نوع ردیاب مذکور، با داشتن قابلیت دوران حول دو محور معین، قابلیت تعقیب هر دو زاویه‌ی سمت و ارتفاع خورشید را دارند. در این مقاله به بررسی ردیاب‌های دومحوره قطبی پرداخته می‌شود. در ادامه این بخش، به بررسی طرح‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین برای ردیاب دومحوره قطبی و بیان نقاط قوت و ضعف هرکدام پرداخته می‌شود.

بلانسو و همکاران[10] در سال ۲۰۰۱ الگوریتمی برای پیش‌بینی بردار خورشید ارائه کردند که در عین دقیق بودن هزینه محاسباتی کمی داشته باشد بدین منظور با استفاده از اطلاعات زمان و موقعیت جغرافیایی می‌توانست جهت بردار خورشیدی را با خطای کمتر از ۰/۵ درجه پیش‌بینی کند. عبدالله و نیجمه[13] در سال ۲۰۰۴ یک سامانه ردیاب دو محوره ارائه کردند که بر اساس یک الگوریتم حلقه باز و با استفاده از واحد PLC انجام می‌شد. یک محور حرکت در راستای شمالی جنوبی و دیگری حول محور عمودی حرکت انجام می‌داد که این سامانه روزانه تا ۴۲٪ انرژی بیشتری نسبت به یک

صفحه خورشیدی ثابت ذخیره می‌کند. ارباب و همکاران [6] در سال ۲۰۰۹ سامانه ردیاب خورشید دو محوره ای بر پایه‌ی پردازش تصویر طراحی کردند. آنها برای عملی کردن این ایده از سایه یک میله برای تشخیص زاویه انحراف صفحه خورشیدی از خورشید استفاده کردند. سامانه پیشنهادی آن‌ها مستقل از تنظیمات روزانه یا ماهانه بود.

ایلماز و همکاران[14] در سال ۲۰۱۵ معادلات حاکم بر تابش خورشید و زوایای تابش را مورد بررسی قرارداده و آن‌را بر روی یک ردیاب دو محوره از نوع آزیموت به همراه سنسور به‌کار برده‌اند که نویسنده میزان بازده ردیاب خود را ۲۴/۵ % اعلام کرده‌است. نارن دارسین و همکاران [15] در سال ۲۰۱۶ یک سامانه ردیاب غیرفعال از نوع حلقه باز را آزمایش کردند. این ردیاب حلقه باز از ۳ نوع گاز: تینر، متانول و استون استفاده می‌کرد. آزمایش‌ها حاکی از آن بود که این سامانه ۲۳/۳۳ % انرژی بیشتری را ذخیره می‌کند.

فتح آبادی[16] در سال ۲۰۱۶ یک ردیاب دو محوره از نوع آزیموت-التیتیود طراحی کرده که خورشید را بدون سنسور و به‌صورت حلقه باز ردیابی می‌کند. او در نتایج خود دقت زاویه‌ای سامانه خود را ۰/۴۳ درجه عنوان‌کرده که در مقایسه با نمونه‌های حلقه بسته ذکر شده در مقاله اش از دقت بالاتری برخوردار است. در مقاله‌ای دیگر از فتح آبادی[17] در سال ۲۰۱۷ از یک ردیاب دو محوره آزیموت-التیتود همراه با سنسور استفاده کرده که هر دو مزیت ردیاب‌های حسگردار و بدون حسگر را دارا است و از دقت رهگیری ۰/۱۱ درجه برخوردار است. روبلس و همکاران[18] در سال ۲۰۱۷ یک ردیاب دو محوره از نوع قطبی طراحی کردند و آن را به‌وسیله حسگر تشخیص تابش نور کنترل کردند. در سازوکار ردیاب قطبی که ایشان طراحی کرده‌اند از دو چرخ‌دنده حلزونی جهت انتقال قدرت از موتور به محورهای دوران استفاده شده‌است. از جمله مزایای این طرح عدم پیچیدگی و خاصیت خودقفل‌شوندگی است اما یکی از بزرگترین معایب این طرح بازده بسیار پایین در تولید انرژی است که تنها حدود ۵ تا ۹ درصد بازده بالاتری نسبت به صفحه خورشیدی ثابت دارد.

سمیرنو و همکاران[19] در سال ۲۰۱۷ بر روی ردیاب دومحوره‌ی خود یکی از دقیق‌ترین الگوریتم های ردیاب خورشیدی به نام NRELSPA را پیاده کردند. ردیاب طراحی شده توسط سمیرنو و همکاران[19] با توجه به اطلاعات جغرافیایی داده شده به سامانه، قابلیت دوران همراه با بردار حرکت خورشید را از صفر تا ۱۸۰ درجه دارا است و می‌تواند پس از غروب آفتاب به‌صورت خودکار به حالت اولیه (زاویه‌ی صفر درجه) بازگردد و همچین در طراحی این ردیاب از سازوکاری استفاده شده‌است که تحت هیچ شرایطی سایه روی صفحه تشکیل نمی‌شود.

فرانکوویچ و همکاران[20] در سال ۲۰۱۷ به طراحی و ساخت ردیاب دومحوره‌ای جهت استفاده آزمایشگاهی و مشاهده اثرات انواع مختلف تابش بر روی ردیاب پرداخته و نتایج آزمون‌های تجربی انجام‌شده را ارائه نمودند. مصطفی تحسین و همکاران[21] در سال ۲۰۱۹ ردیاب دومحوره‌ای با طرح جدید با هدف افزایش بازده ردیاب ارائه نمودند که بر اساس آزمون‌های تجربی انجام‌شده، حدود ۳۸ درصد افزایش بازده داشت. این طرح شامل ۴ حس‌گرمقاومت نوری، دو سروو موتور و یک برد آردوینو UNO است. هایسیم روسما و همکاران[22] در سال ۲۰۱۸ یک ردیاب دومحوره شامل ۴ حسگر مقاومت نوری(Light Detector Resistor)، دو سروو موتور و برد آردوینو را ارائه نمودند که تا ۶۰ درصد بازده تولید انرژی را نسبت به یک پنل ثابت در زاویه مشخص افزایش داد.

از جمله مزایای طرح ارائه شده توسط یائو و همکاران[23] برای ردیاب دومحوره قطبی می‌توان به کنترل گروهی صفحات خورشیدی روی این سازه، داشتن حرکت روان سامانه انتقال قدرت این سازه (تسمه و پولی) و داشتن ممان‌اینرسی کم اشاره‌کرد. این سامانه دارای معایبی ازجمله افتادن سایه روی صفحات خورشیدی در برخی ساعات روز، داشتن اشتباهات سینماتیکی به دلیل خطاهای مکانیکی، تغییر شکل تسمه به دلیل قرارگرفتن در شرایط خاص، انتقال بارهای دینامیکی (وزش باد و ...) به محرک محورهای اصلی و عدم صرفه‌ی اقتصادی در تولید انبوه اشاره کرد.

الکساندرو[24] ابتدا یک سازوکار برای سامانه ردیاب خورشیدی ارائه کرد. از مزیت‌های این سازه پیچیدگی کم، تعادل استاتیکی و دینامیکی خوب و ثبات در برابر حرکت صفحه خورشیدی است. او با این طرح توانست بازده را تا ۴۰/۴ درصد نسبت به یک صفحه‌ی خورشیدی ثابت افزایش دهد. اما از معایب این طرح می‌توان به استفاده از عمل‌گرها اشاره کرد زیرا علاوه بر افزایش هزینه اولیه، برای به حرکت درآوردن عمل‌گرها باید از موتورهای الکتریکی استفاده کرد و این امر سبب افزایش انرژی مصرفی می‌شود.

الکساندرو[25] در طرحی دیگر یک ردیاب قطبی طراحی کرد که در آن از موتور دی‌سی و چرخدنده‌های حلزونی استفاده شده تا سامانه به دلیل وجود اصطکاک بین دندانه‌های چرخدنده خاصیت خودقفل‌شونده پیدا کند. در این سازه از وزنه‌هایی جهت ایجاد تعادل استاتیک و دینامیکی استفاده می‌کند که باعث کاهش گشتاور لازم جهت حرکت موتور می‌شود. از مزایای این سامانه می‌توان به خاصیت خودقفل‌شوندگی و عدم تشکیل سایه روی صفحه اشاره نمود. از معایب این طرح می‌توان به عدم امکان چرخش ۳۶۰ درجه‌ای صفحه خورشیدی اشاره نمود. چائووانان جامروئن و همکاران[26] در سال ۲۰۱۹ طرحی برای ردیاب دومحوره ارائه نمودند که از جمله مزایای این طرح صرفه‌ی اقتصادی آن عنوان شده‌است، اما در این طرح ابعاد مدل ساخته‌شده کوچک است و مناسب طرح‌های آزمایشگاهی است. از معایب این طرح می‌توان به عدم وجود خاصیت خودقفل‌شوندگی اشاره نمود و در طرح آن‌ها از یک عمل‌گر استفاده شده که هزینه طراحی را بالا می‌برد. در طرح چائووانان جامروئن و همکاران[26] از ردیابی نقطه بیشینه توان و

کنترل حلقه بسته نیز استفاده شده‌است، اما تنها توانستند حدود ۴۵ درصد تولید انرژی الکتریکی را افزایش دهند.

در جدول(۳) که در پیوست الف نمایش داده شده‌است، ویژگی‌های طرح‌های پیشین برای ردیاب‌های دومحوره به طور خلاصه ارائه شده است. در این مقاله، طرح جدیدی برای ردیاب خورشیدی دومحوره قطبی پیشنهاد می‌گردد و پس از ساخت و اعمال یک روش کنترلی حلقه‌باز، عملکرد آن در تولید انرژی الکتریکی در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت، مورد ارزیابی تجربی و مقایسه قرار می‌گیرد. ردیاب پیشنهادی، قابلیت دوران ۳۶۰ درجه حول هر دو محور خود را دارد که این ویژگی باعث می‌شود ردیاب مذکور بدون هیچگونه محدودیتی در هر مختصات جغرافیایی از جمله نواحی نزدیک به قطب شمال یا قطب جنوب یا ساعات ابتدایی و انتهایی روز که راستای تشعشع خورشید به شدت مایل است، قابل استفاده باشد. همچنین، ردیاب پیشنهادی دارای قابلیت هم‌بندی، نصب و بهره‌برداری سریع و آسان است. به علاوه، ردیاب مذکور دارای خاصیت خودقفل‌شوندگی است که این امر باعث حفاظت موتورها از چرخش‌های ناخواسته ناشی از باد یا ضربه گردیده و همچنین، از چرخش صفحه خورشیدی در لحظاتی که موتورهای دی‌سی خاموش هستند یا اغتشاشاتی مانند باد یا جاذبه اعمال می‌شود، جلوگیری می‌کند.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم به طراحی مفهومی ردیاب پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش سوم به طراحی اجزای مختلف ردیاب به طور مفصل پرداخته شده‌است. در بخش چهارم الگوریتم حلقه باز مورد استفاده در آزمون‌های تجربی و همچنین کنترل موتورهای دی‌سی توضیح داده شده و با انجام آزمون‌های تجربی، توان تولیدی ردیاب خورشیدی پیشنهادی در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات مطرح می‌گردند.

۲- طراحی مفهومی سامانه صفحه خورشیدی مجهز به ردیاب

در ادامه با توجه به مرور طرح‌های پیشین ردیاب خورشیدی، طرح جدیدی پیشنهاد می‌گردد که در آن مشکلات و معایب موجود در طرح‌های پیشین تا حد امکان کاهش یافته‌باشد. در طرح پیشنهادی [27]برای ردیاب دو محوره پیشنهادی، امکان چرخش ۳۶۰ درجه‌ای صفحه خورشیدی وجود داشته که باعث می‌شود در ساعات ابتدایی یا انتهایی روز یا نواحی جغرافیایی نزدیک به قطب شمال و جنوب که راستای تشعشع خورشید بسیار مایل است، امکان ردیابی خورشید وجود داشته باشد. همچنین، در طرح پیشنهادی به دلیل استفاده از اتصالات پیچ و مهره و اجزای ماژولار، حمل و نقل، هم‌بندی، نصب و راه‌اندازی ردیاب به سرعت و به آسانی قابل‌انجام است. در شکل(۱) طرح ردیاب دومحوره قطبی پیشنهادی قابل‌مشاهده است.

شکل ۱) شماتیک طرح پیشنهادی برای ردیاب دو محوره[27]

در این طرح از موتور دی‌سی به همراه جعبه دنده حلزونی با نسبت ۱:۵۰ استفاده‌شده‌است که وظیفه‌ی دوران صفحه خورشیدی حول محور شرقی-غربی و تعقیب زاویه انحراف را به عهده دارد. برای دوران صفحه خورشیدی حول محور شمالی-جنوبی و تعقیب زاویه ساعتی از موتور دی‌سی به همراه جعبه دنده حلزونی استفاده شده‌است. از پروفیل‌های مورب با پخ ۴۵ درجه برای جلوگیری از خیز ستون‌های اصلی تکیه‌گاه استفاده شده‌است. از وزنه تعادلی (جهت ایجاد نابالانسی) برای کاهش گشتاور وارد به موتور استفاده شده‌است که باعث کاهش انرژی مصرفی موتور می‌شود. با توجه به شکل(۱) مشاهده می‌شود که تحت هیچ شرایطی سایه بر روی صفحه‌ی خورشیدی ایجاد نمی‌شود که این خود یک مزیت بسیار بزرگ به حساب می‌آید. این سامانه دو درجه آزادی، قابلیت حرکت ۳۶۰ درجه را دارا است که با توجه به این خاصیت، از این طرح در هر نقطه‌ای از جهان می‌توان از آن استفاده‌کرد. از دیگر ویژگی‌های مهم این طرح می‌توان به خاصیت خود قفل‌شوندگی سامانه اشاره-کرد که با تنظیم اتوماتیک سامانه توسط برنامه‌ی داده‌شده به آن، پس از عمودکردن صفحه خورشیدی بر راستای تابش خورشید، موتور را از مدار خارج می‌کند و به کمک جعبه‌دنده‌های درنظر-گرفته‌شده از نوع حلزونی، صفحه را ثابت نگه می‌دارد. بدین ترتیب انرژی کمی برای تغییر جهت پنل و ثابت نگه داشتن آن در موقعیتی خاص مصرف می‌شود. همچنین، این امر باعث می‌شود در صورت غیرفعال‌شدن موتورها، صفحه خورشیدی در موقعیت خود باقی بماند و در اثر عواملی مانند نیروهای جاذبه و باد دچار چرخش نشده و به موتورها هم آسیبی نرسد و عمر مفید موتورها افزایش یابد.

۳- طراحی جزئی سامانه‌ی صفحه‌ی خورشیدی مجهز به ردیاب

در این بخش به طراحی اجزای به‌کار رفته که عبارت اند از: محور- جعبه‌دنده حلزونی- پروفیل- موتور و یاتاقان پرداخته می‌شود

طراحی ابتدا با جعبه‌دنده حلزونی آغاز می‌شود. سپس با مشخصات به‌دست‌آمده گشتاور موردنیاز برای موتورها محاسبه می‌شود. پس از آن با استفاده از متغیرهای هندسی به‌دست‌آمده از طراحی جعبه‌دنده به طراحی محور و یاتاقان پرداخته‌می‌شود و در نهایت جهت اطمینان پیداکردن از عملکرد پروفیل‌ها تحت بار و گشتاور در نرم‌افزار سالیدوورکس و به کمک روش اجزای محدود استحکام آن‌ها بررسی می‌شود. طراحی هر بخش بر طراحی بخش‌های دیگر تاثیر می‌گذارد، بنابراین طراحی هر بخش در زبان برنامه‌نویسی متلب انجام گرفته‌است تا تمام بخش‌ها به سرعت به‌روز شوند. برای طراحی اجزای ردیاب دو محوره از استانداردهای موجود در کتاب طراحی اجزای شیگلی [28] و کتاب طراحی اجزا ژونیوال[29] استفاده شده‌است. در ادامه این بخش، به بررسی برخی اجزای مهم ردیاب که در دینامیک سازه تاثیر بسیاری دارند پرداخته می‌شود.

۳-۱- طراحی جعبه‌دنده

حداکثر توانی که جعبه‌دنده حلزونی باید تحمل کند زمانی است که محور اصلی بصورت قائم، قرار گرفته است. در این تحلیل اثر وزنه تعادلی را جهت تعیین حالت بحرانی از طراحی حذف‌کردیم تا گشتاور بیشینه، که حاصل از مرکز جرم اجزای ردیاب را نسبت به محور اصلی محاسبه‌کنیم. مرکز جرم اجزایی که حول محور اصلی گشتاور ایجاد می‌کنند، به فاصله ۴۴cm از محور اصلی قرارگرفته‌اند. مقدار گشتاور ایجاد شده حول این محور عبارتست از:

$$T_d = I\alpha + \omega d \qquad (۱)$$

در این فرمول α و ω به ترتیب، شتاب زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای محور اصلی، I ممان اینرسی جرمی سازه و d فاصله مرکز سطح و T_d گشتاور حول محوراصلی می‌باشد. در معادله (۱) ممان اینرسی جرمی برابر $3Kg/m^2$ است. برای محاسبه‌ی مقدار بحرانی شتاب زاویه‌ای به بیشینه مقدار تغییرات زاویه‌ی تابش خورشید نیاز است که از طریق الگوریتم NOAA [30] جهت تعیین موقعیت خورشید در کدنویسی‌های نرم‌افزار متلب استفاده‌می‌شود. نخستین فرض این است که ردیاب طی ۱ ثانیه از حالت سکون به سرعت زاویه‌ای s/ ۰/۴° برسد، بنابراین مقدار شتاب زاویه‌ای بحرانی عبارت است از :

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega}{t} = 7x10^{-3} rad/s \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) t بیانگر زمان است. حال بر اساس معادله (۱) گشتاور حول محور اصلی ۴۵N.m محاسبه می‌شود. بنابراین حداکثر توان عبارت است از:

$$p_{max} = T_d\omega = 0.315 watt \qquad (۳)$$

p_{max} توان بیشینه ردیاب است. برای ردیاب دومحوره مذکور یک جعبه‌دنده آماده با مشخصات نزدیک به مشخصات طراحی اما با نسبت تبدیل ۱ به ۵۰ بکار گرفته می‌شود.

۳-۲- طراحی محورها و یاتاقان‌ها

طراحی تنها برای محوری انجام می‌شود که نسبت به دو محور دیگر بار بیشتری تحمل می‌کند. به این محور گشتاور پیچشی ناشی از وزنه تعادلی و مرکز جرم سایر اجزا و وزن نیروهای تکیه‌گاهی ناشی از یاتاقان‌ها و نیروی برشی ناشی از وزن اجزا، نیروی ناشی از حلزون اعمال شده که به ۳ نیروی محوری، شعاعی و مماسی تقسیم می‌شوند. طبق انجام محاسبات کوچک ترین قطر ۱۲mm محاسبه شد و بیشترین قطر ۱۵mm می‌باشد. در طراحی محورها، فرض می‌شود محورها در تعادل استاتیکی قرار دارند و به دلیل حرکت آهسته ردیاب، اثرات ناشی از خستگی به آن سازه وارد نمی‌شود. در ابتدا چنس محورها از فولاد ۱۰۲۰AISI فرض می‌شود. ضریب اطمینان سازه نیز ۲ فرض شده‌است. لازم به ذکر است که جنس محورهای به‌کار رفته در ردیاب طراحی شده از نوع فولاد St37 درنظر گرفته می‌شود تا ضریب اطمینان سامانه افزایش یابد. در ساخت این ردیاب از ۴ یاتاقان استفاده شده‌است. طراحی بر مبنای یاتاقانی انجام می‌شود که بار بیشتری را تحمل می‌کند و از طراحی سایر یاتاقان‌ها صرف‌نظر می‌شود. اطلاعات مورد نیاز برای طراحی این یاتاقان عبارت‌اند از: نیروهای تکیه‌گاهی، سرعت دوران محور و قابلیت اعتماد که ۹۹٪ و ضریب بار کاربردی نیز ۱/۲ فرض شده‌است. همچنین، عمر مطلوب برای یاتاقان ۳۰۰۰۰ ساعت درنظر گرفته شد. در نهایت، یاتاقان UCP202 با قطر ۱۲mm قابل انتخاب است، اما برای هم‌خوانی با محورها، یاتاقان با قطر ۱۵mm انتخاب می‌شود

۳-۳- انتخاب موتور

انتخاب موتور به معنی انتخاب گشتاور و سرعت لازم برای آن موتور می‌باشد. گشتاور لازم برای موتور جهت دوران محور اصلی همان گشتاور ورودی در جعبه‌دنده حلزونی می‌باشد که طبق محاسبات در قسمت های قبل این مقدار برابر ۰/۵۴N.m می‌باشد. گشتاور لازم جهت دوران محور ثانویه بسیار ناچیز است زیرا مرکز جرم اجزای سوار بر این محور تقریبا بر خود محور منطبق است.

$$T_{in} = \frac{T_{0ut}}{m_g\eta} = \frac{13.5}{50x0.5} = 0.54\ N.m \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، T_{in} و T_{0ut} به ترتیب گشتاور ورودی و خروجی موتور دی‌سی انتخابی، m_g نسبت دندانه‌های جعبه دنده و η بازده جعبه‌دنده می‌باشد. در این سامانه از موتورهای دی‌سی جعبه‌دنده‌دار برای هر دو محور دوران که خاصیت خودقفل‌شوندگی را دارا می‌باشند، استفاده می‌شود. موتور انتخاب شده دارای سرعت نامی موتور ۳/۵rpm و گشتاور نامی آن ۷/۵ N.m است و بنابراین برای ردیاب، موتور مناسبی می‌باشد.

۳-۴- بدنه و اتصالات

برای ساخت بدنه‌ی اصلی از پروفیل‌های شیاردار آلومینیومی سبک از جنس آلومینیوم ۶۰۶۳ با سایز سطح مقطع ۳۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. مزیت این پروفیل‌ها وجود اتصالات استاندارد OBC برای آن‌هاست و چون این سازه برای پژوهش ساخته می‌شود، پژوهشگران بعدی می‌توانند تغییرات دلخواه را در آن اعمال کنند.

۳-۵- بخش کنترلی ردیاب

برای طراحی بخش کنترل دستگاه و هدایت صفحه خورشیدی، از بردهای سری آردوینو مدل ATmega2560 استفاده شده‌است. دلیل استفاده از این سری بردهای آردوینو، حافظه ذخیره‌سازی بالا و قدرت پردازش مناسب آن می‌باشد. همچنین به برد فوق یک برد RTC مدل Ds1307 که در واقع یک مدار محاسبه‌گر زمان است نیز اضافه شده‌است تا با این مدار بتوان اطلاعاتی همچون ساعت، دقیقه، ثانیه، سال، ماه و روز را دریافت و ذخیره کرد[25].

با توجه به تئوری ذکر شده در بخش دوم و مراحل شش‌گانه طراحی ذکر شده در بخش سوم به ساخت ردیاب موردنظر در آزمایشگاه پرداخته می‌شود و نمونه‌ی اولیه ساخته‌شده حین انجام آزمون تجربی در شکل(۲) قابل‌مشاهده است. پس از ساخت این ردیاب به انجام آزمایش‌های تجربی پرداخته می‌شود. مشخصات اجزای ردیاب خورشیدی ساخته‌شده نیز در جدول(۱) قابل‌مشاهده است.

جدول ۱) مشخصات اجزای ردیاب پیشنهادی

پنل خورشیدی ZT-60 PV module	
توان نامی (P_m)	۶۰ وات
ولتاژ در توان بیشینه(V_{mp})	۱۸/۰۱ ولت
جریان در توان بیشینه(I_{mp})	۳/۳۶ آمپر
مشخصات موتور دی‌سی	
ممان اینرسی(J)	$kgm^2/s^2$۰/۰۱
سرعت بی‌باری	rpm۵/۷
جریان بی‌باری	>۰/۵A
ولتاژ نامی	۱۳/۵
گشتاور بیشینه	Nm۷/۵
مشخصات گیربکس	
نسبت تبدیل	۱:۵۰
بخش سازه (پروفیل مهندسی)	
سایز پروفیل مهندسی	۳۰mm x ۳۰mm
وزن	۷۹۰ گرم به ازای هر متر
مساحت	۳/۱cm^2
ممان اینرسی سازه	$kg.m^2$۳
جنس	آلومینیوم ۶۰۶۳
بخش کنترلی	
برد کنترلی	بردهای سری آردوینو مدل Mega با میکرو کنترلر مدل ATmega2560
برد زمان	برد RTC مدل Ds1307
مدار هدایت زمان	درایور L298N

شکل ۲) نمونه ردیاب ساخته شده

۴- کنترل حلقه باز سامانه ردیاب خورشیدی به صورت تجربی

در این بخش، ابتدا الگوریتم کنترلی حلقه باز مورد استفاده در آزمون تجربی ارائه می‌گردد. در ادامه، الگوریتم ردیابی و کنترل موتورهای دی‌سی مطرح می‌گردند. در نهایت، با انجام آزمون‌های تجربی، عملکرد ردیاب دومحوره پیشنهادی در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۱- الگوریتم کنترل حلقه باز مورد استفاده در آزمون تجربی

در این بخش به بررسی زوایای خورشیدی موردنیاز که در این طرح و شبیه‌سازی آن به‌کار می‌روند پرداخته‌می‌شود. مکان جغرافیایی بر روی زمین به ترتیب با عرض جغرافیایی، θ و طول جغرافیایی، ϕ نمایش داده‌می‌شود. در گام نخست زاویه انحراف بیان می‌شود که مستقل از مکان خورشید است و تنها به تاریخ وابسته است. زاویه انحراف زاویه‌ای است که پرتوهای خورشید با صفحه استوا می‌سازد[31].

$$\delta = 23.5 sin\left(\frac{360(284+N_d)}{365}\right) \quad (۵)$$

سپس به بررسی زاویه ساعتی پرداخته می‌شود. زاویه‌ای که زمین در طول یک روز حول محور قطبی خود دوران می‌کند، که رابطه آن مطابق فرمول(۶) به‌دست می‌آید[31]:

$$\omega = 15(12-h) \quad (۶)$$

ω زاویه ساعتی و h زمان موردنظر بر حسب ساعت در طول روز است. در فرمول شماره (۶)، h بر حسب ساعت خورشیدی باید بیان شود که با ساعت محلی در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف تفاوت‌هایی جزئی دارد اما از طریق روابط ریاضی، ساعت محلی موقعیت‌های جغرافیایی به ساعت خورشیدی تبدیل‌می‌شوند و محاسبات انجام می‌شود. زاویه آلتیتوت(ارتفاع)، زاویه‌ای است که خورشید با خط افق می‌سازد و زاویه آزیموث(سمت) زاویه‌ای است که تصویر خط واصل خورشید تا مبدا بر روی صفحه افقی با محور شمالی تشکیل می‌دهد این زوایا به ترتیب از روابط(۷) و (۸) به‌دست می‌آیند[31].

$$\alpha_A = sin^{-1}(sin\delta sin\theta + cos\delta cos\omega cos\theta) \quad (۷)$$

$$\gamma = sin^{-1}\left(\frac{-\cos\delta \sin\omega}{\cos\alpha_A}\right) \quad (۸)$$

در ادامه زاویه اوج (زنیت) زاویه بین خط تلاقی پرتوخورشیدی و خط عمود بر زمین در نقطه هدف تشکیل می‌شود، اطلاق می‌گردد[31]

$$\cos\theta_z = (\cos\delta\cos\omega\cos\theta + \sin\delta\sin\theta) \quad (۹)$$

در ادامه بردار مکان n را با توجه به رابطه‌های(۷) و (۸) به‌دست می‌آید.

$$\hat{n}_{xyz} = (\sin\gamma\cos\alpha_A, \cos\gamma\cos\alpha_A, \sin\alpha_A) \quad (۱۰)$$

حال از زاویه‌ای دیگر به بررسی بردار نرمال موقعیت مکانی n پرداخته می‌شود و توسط دو زاویه حرکت ردیاب یعنی زوایای θ_{CL} و θ_{DE} بیان می‌شود که مطابق فرمول(۱۱) می‌باشد.

$$\hat{n}_{xyz} = (\sin\theta_{CL}, \sin\theta_{DE}\cos\theta_{CL}, \cos\theta_{CL}\cos\theta_{DE}) \quad (۱۱)$$

از ترکیب روابط (۱۰) و (۱۱) می‌توان روابط زوایای حرکتی دو محور DE و CL را که برای زوایای حرکتی ردیاب دو محوره هست را بر حسب سایر روابط زوایای خورشیدی که تا به اینجا بیان شد می‌توان به‌دست آورد و این زوایا در رابطه (۱۲) قابل مشاهده می‌باشد.

$$\begin{cases} \tan\theta_{DE} = \cos\gamma\cot\alpha_A \\ \sin\theta_{CL} = \sin\gamma\cos\alpha_A \end{cases} \quad (۱۲)$$

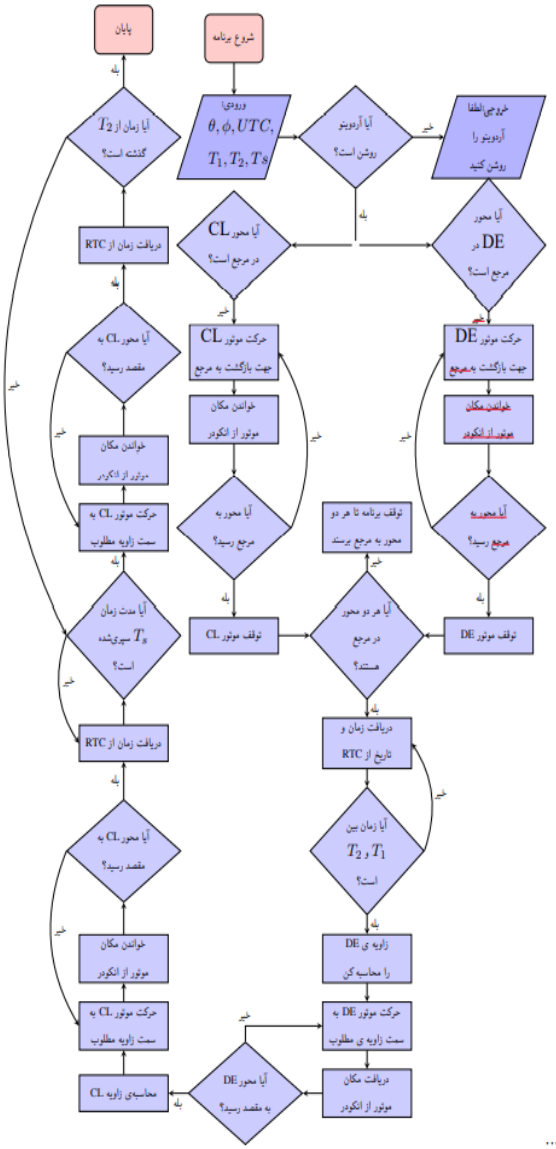
با توجه به اینکه این ردیاب در شهر تهران مورد آزمایش قرار گرفته‌است که طول و عرض جغرافیایی این شهر به ترتیب برابر با ۵۱/۴ و ۳۵/۸ درجه است.

۴-۲- الگوریتم ردیابی و کنترل موتورهای دی‌سی مورد استفاده در آزمون تجربی

الگوریتم ردیابی خورشید در ابتدا چند ورودی را بر مبنای موقعیت نصب و زمان ردیابی از کاربر دریافت می‌کند. از جمله: طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، اختلاف زمانی محل نصب با ساعت جهانی، زمان شروع ردیابی، زمان پایان ردیابی، زمان توقف بین دو مرحله ردیابی.الگوریتم ردیابی خورشیدی طراحی شده در شکل(۳) به‌صورت خلاصه ارائه شده است. لازم به ذکر است که پس از پایان ردیابی در انتهای روز، ردیاب بطور خودکار به نقطه مرجع تعریف شده بازمی‌گردد و در ابتدای روز بعد، از نقطه مرجع به زاویه مدنظر آن روز جهت شروع به ردیابی خورشید حرکت می‌کند.

همان‌طور که در شکل(۴) مشخص‌است از دو کنترل حلقه بسته جهت کنترل موتورهای ردیاب استفاده‌شده‌است. ورودی این دو سامانه دو زاویه دوران ردیاب یعنی زاویای DE و CL است که توسط آردوینو محاسبه می‌شود و خروجی آن زوایایی است که موتورها در آن متوقف می‌شوند.

ابتدا به توضیح الگوریتمی که جهت حرکت محورهای DE (زاویه بین محور عمود بر صفحه‌خورشیدی و زاویه تابش خورشید) و CL (محور زاویه‌ساعتی صفحه‌خورشیدی) که در شکل(۱) نمایش داده‌شده‌اند پرداخته می‌شود.

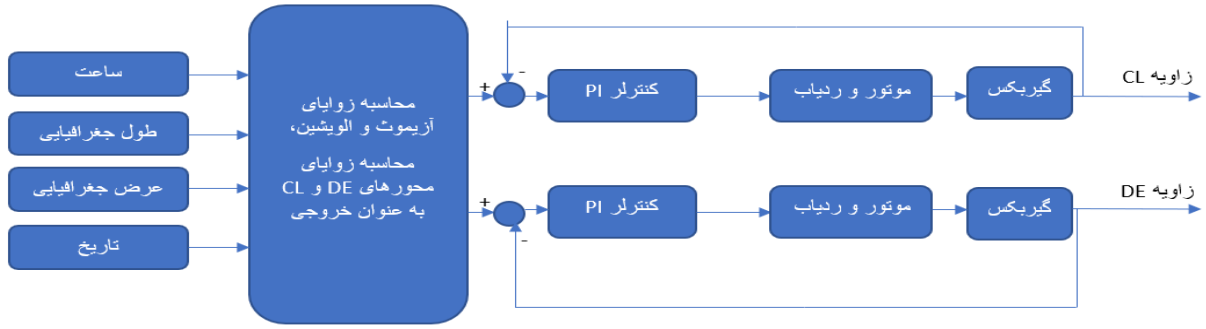


شکل۳) الگوریتم ردیابی خورشید

$$\theta'_{cl} = \omega \quad (۱۳\text{-الف})$$

$$\theta'_{DE} = 90^0 - \alpha_A^{noon} \quad (۱۳\text{-ب})$$

که در فرمول (۱۳-ب) α_A^{noon} زاویه‌ی ارتفاع خورشید در هنگام ظهر و در فرمول (۱۳-الف) ω زاویه‌ی ساعتی می‌باشد. این رابطه بیان می‌کند که در ردیاب قطبی محور CL باید با سرعت ثابت ۱۵ °/hour دوران کند. مهم‌ترین ساده‌سازی درنظر گرفته شده در الگوریتم ردیابی جهت کاهش مصرف انرژی موتورها، این است که محور DE تنها یک بار در روز تنظیم می‌شود، به‌طوری‌که صفحه خورشیدی در ظهر بر راستای تشعشع خورشید عمود باشد. ضرایب کنترلر تناسبی-انتگرالی(PI) برای محور CL به ترتیب برابرست با ۱۰ و ۱، همچنین ضریب کنترلر انتگرالی-تناسبی(PI) برای محور DE نیز به ترتیب برابرست با ۱۰ و۲.



شکل ۴) شماتیک نمودار جعبه‌ای سامانه کنترل حلقه بسته موتورهای ردیاب

۴-۳- نتایج تجربی کنترل حلقه باز ردیاب خورشیدی

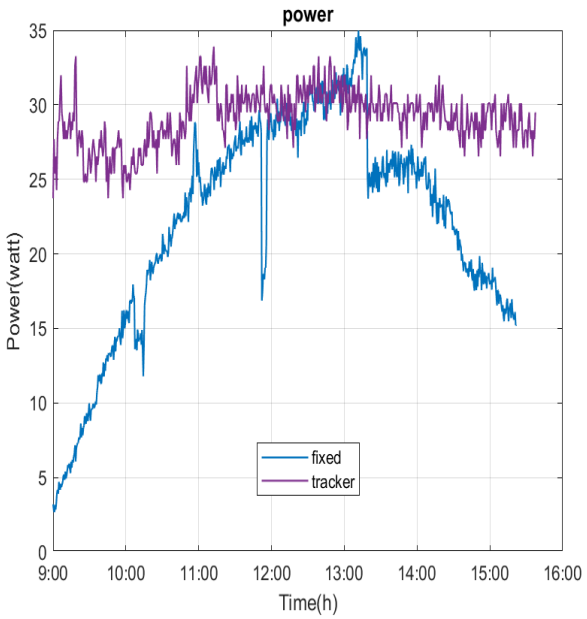
به منظور ارزیابی عملکرد ردیاب خورشیدی پیشنهادی در این پژوهش با اعمال کنترل حلقه باز، لازم است میزان توان تولیدی آن در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد. به این منظور، ابتدا صفحه خورشیدی در حالت ثابت، طوری تنظیم شد که در هنگام ظهر، صفحه خورشیدی بر تابش خورشید عمود باشد. همچنین، ردیاب دومحوره قطبی طراحی و ساخته شده در این پژوهش، نیز در معرض تشعشع خورشید قرار گرفته و بر اساس الگوریتم‌های حلقه باز (ارائه شده در بخش ۴-۱ این مقاله)، شروع به حرکت می‌نماید. صفحات خورشیدی مذکور از ساعت ۹ صبح تا حوالی ۳:۳۰ بعدازظهر در معرض تابش خورشید قرار گرفته و با ثبت مقادیر ولتاژ و شدت جریان الکتریکی تولیدی از طریق حس‌گرها، توان تولیدی آن‌ها محاسبه می‌شوند.

از جمله فرضیات درنظر گرفته شده در انجام آزمایش‌های تجربی می‌توان به تنظیم محور DE یک بار در روز، پایدار بودن تابش و انتشار یکنواخت آن در هر لحظه، کوچکتر بودن فرکانس شبکه از فرکانس مبدل و مصرف‌کننده، عدم تاثیر ذرات معلق و گرد و غبار موجود در هوا (تمیز بودن صددرصدی صفحه خورشیدی ردیاب) اشاره نمود. همچنین، در تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، تاثیر نیروی باد بر سازه و ایجاد ارتعاش و همچنین تاثیر باد بر دمای صفحه خورشیدی (با توجه به انجام آزمایش‌ها در فصل تابستان) لحاظ نشده‌اند.

شکل(۵) نمودارهای توان الکتریکی تولیدی توسط صفحه خورشیدی ثابت و همچنین صفحه خورشیدی مجهز به ردیاب دومحوره قطبی پیشنهادی را نمایش می‌دهد، همچنین ملاحظه می‌شود که صفحه خورشیدی ثابت تنها در هنگام ظهر دارای بیشینه توان الکتریکی تولیدی است، در حالی که ردیاب دومحوره قطبی در بازه زمانی بسیار بزرگ‌تری توان بیشینه‌ای تولید می‌نماید. به منظور مقایسه کمی میزان انرژی تولیدی صفحه خورشیدی ثابت و ردیاب دومحوره، لازم است میزان انرژی الکتریکی تولید شده توسط صفحات خورشیدی محاسبه گردد. این امر، با محاسبه مساحت زیر نمودارهای ارائه شده در شکل(۵) و به کمک کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام می‌پذیرد. بر این اساس، مقدار انرژی الکتریکی تولیدی توسط صفحه خورشیدی ثابت و ردیاب دومحوره قطبی پیشنهادی در این پژوهش، به ترتیب برابر با ۷۵ وات-ساعت و ۱۱۵ وات-ساعت می‌باشد. از طرفی، میزان انرژی الکتریکی مصرفی هر دو موتور الکتریکی در حدود ۳ وات-ساعت است. بنابراین، انرژی الکتریکی خالص تولیدی ردیاب دومحوره قطبی برابر با ۱۱۰ وات-ساعت خواهد بود که نمایانگر افزایش انرژی الکتریکی خالص دریافتی توسط ردیاب پیشنهادی در این پژوهش به میزان حدود ۴۹ درصد(به‌صورت دقیق ۴۸/۸۳٪) نسبت به صفحه خورشیدی ثابت است.

جدول ۲) انرژی خالص و تولیدی پنل ثابت و ردیاب دو محوره حلقه باز در آزمایش‌های تجربی

شماره	آزمایش	انرژی تولیدی (J)	انرژی مصرفی موتورها (J)	انرژی خالص(J)
۱	پنل ثابت	۲۵۳۵۷۷/۱۶	-	۲۵۳۵۷۷/۱۶
۲	ردیاب دو محوره خورشیدی حلقه باز	۳۸۳۴۳۶/۷۲	۱۲۰۰۰	۳۷۱۴۳۶/۷۲



شکل ۵) مقایسه انرژی دریافتی ردیاب (نمودار بنفش) و صفحه خورشیدی ثابت(نمودار آبی) در آزمایش تجربی

با توجه به تنظیم محور DE به‌صورت یک‌بار در روز با کمک محاسبه از طریق الگوریتم ردیابی پیشنهادی و مقایسه با زوایای پیشنهادی هنگام تنظیم لحظه‌ای محور DE می‌توان به این نتیجه رسید که خطای ردیابی زوایای خورشیدی (موقعیت خورشید در هر لحظه) توسط ردیاب با الگوریتم ساده‌سازی شده (جهت کاهش انرژی مصرفی سامانه) حدود ۰/۲۵ درجه است که با توجه به تاثیر چشمگیر این ساده‌سازی در افزایش بازدهی سامانه و مقایسه با کار سایرین خطای قابل قبولی بوده‌است و می‌توان از این سامانه در شرایط مختلف استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، طراحی و ساخت یک ردیاب خورشیدی دومحوره قطبی جدید و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی حلقه باز بر روی آن و در نهایت ارزیابی تجربی عملکرد ردیاب در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت انجام شده است. به این منظور، پس از ارزیابی و مقایسه طرح‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، طرح مفهومی جدیدی برای ردیاب ارائه گردید. طرح پیشنهادی مذکور به گونه‌ای است که علاوه بر قابلیت هم‌بندی، نصب و بهره‌برداری آسان، از ویژگی خودقفل‌شوندگی بهره‌مند بوده که این امر باعث حفاظت موتورها از چرخش‌های ناخواسته ناشی از باد یا ضربه گردیده و همچنین، از چرخش صفحه خورشیدی در لحظاتی که موتورهای دی‌سی خاموش هستند یا اغتشاشاتی مانند باد یا جاذبه اعمال می‌شود، جلوگیری می‌کند. همچنین، ردیاب پیشنهادی به دلیل امکان دوران کامل حول هر دو محور، در هر موقعیت جغرافیایی از جمله قطب شمال یا جنوب و در ساعات ابتدایی و انتهایی روز که راستای تشعشع خورشید به شدت مایل است، قابل استفاده و کاربرد است. در ادامه، پس از طراحی جزئی اجزای ردیاب، تهیه، ساخت و هم‌بندی آن‌ها، روش کنترلی حلقه باز بر روی آن پیاده‌سازی تجربی گردید. در نهایت، با انجام آزمون‌های تجربی، عملکرد ردیاب در مقایسه با صفحه خورشیدی ثابت به لحاظ میزان انرژی الکتریکی تولیدی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج تجربی حاصل، میزان انرژی الکتریکی تولیدی خالص توسط ردیاب، در حدود ۴۹ درصد بیشتر از انرژی الکتریکی تولیدی صفحه خورشیدی ثابت است. از مقایسه طرح پیشنهادی با طرح‌های پیشین، می‌توان به این نتیجه رسید که ردیاب حلقه باز پیشنهادی در این مقاله از طرح‌های بیان شده در مطالعات پیشین از جمله طرح چائووانان جامروئن و همکاران [26] که به کمک ردیابی نقطه بیشینه توان کار می‌کند، توان بیشتری تولید می‌کند (۴۹ درصد افزایش انرژی الکتریکی در طرح پیشنهادی و ۴۵ درصد افزایش انرژی الکتریکی در مطالعه جامروئن و همکاران[26] نسبت به صفحه خورشیدی ثابت). در ادامه، می‌توان با پیاده‌سازی روش‌های کنترلی متفاوت بصورت حلقه بسته و با درنظر داشتن معیارهای اقتصادی به افزایش بازده ردیاب دومحوره پرداخت. همچنین، می‌توان از عملگرهای هیدرولیکی و نیوماتیکی نیز در طراحی این سامانه استفاده نمود. به علاوه، انجام شبیه‌سازی کامل سامانه ردیاب خورشیدی و اعتبارسنجی آن با نتایج تجربی ارائه شده در این مقاله، به عنوان یکی دیگر از پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردد.

تاییدیه اخلاقی

این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتوای مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع

مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از "پژوهشگاه نیرو" به واسطه حمایت مالی از این پژوهش، نهایت تشکر و قدردانی را به عمل آورند (طرح بهتام به شماره ۹۶/۵۱۳۱۳/۰۷).

منابع

1- Dudley B. BP statistical review of world energy 2016. British Petroleum Statistical Review of World Energy, Bplc. editor, Pureprint Group Limited, UK. 2019 Jun.

۲- ساتبا، ون. پتانسیل تابش و نقشه تابش خورشید در ایران ۱۳۹۸

3- Alexandru C. Dynamic simulation of the adaptive sun tracking system used for an electric unmanned ground vehicle. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 Aug 1 (Vol. 568, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.

4- Engin M, Engin D. Optimization controller for mechatronic sun tracking system to improve performance. Advances in Mechanical Engineering. 2013;5:146352.

5- Jadli U, Uniyal S, Uniyal I. Design of a Single-Axis Solar Tracker Using LDRs. InIntelligent Communication, Control and Devices: Proceedings of ICICCD 2017 2018 (pp. 1041-1049). Springer Singapore.

6- Arbab H, Jazi B, Rezagholizadeh M. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow. Renewable Energy. 2009 Apr 1;34(4):1114-8.

7- Neville RC. Solar energy collector orientation and tracking mode. Solar energy. 1978 Jan 1;20(1):7-11.

8- Song J, Yang Y, Zhu Y, Jin Z. A high precision tracking system based on a hybrid strategy designed for concentrated sunlight transmission via fibers. Renewable energy. 2013 Sep 1;57:12-9.

9- Sungur C. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. Renewable energy. 2009 Apr 1;34(4):1119-25.

10- Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla DC, López-Moratalla T, Lara-Coira M. Computing the solar vector. Solar energy. 2001;70(5):431-41.

11- Zhu Y, Liu J, Yang X. Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. Applied Energy. 2020 Apr 15;264:114647.

12- Batayneh W, Bataineh A, Soliman I, Hafees SA. Investigation of a single-axis discrete solar tracking

system for reduced actuations and maximum energy collection. Automation in Construction. 2019 Feb 1;98:102-9.
13- Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control. Energy conversion and management. 2004 Jul 1;45(11-12):1931-9.
14- Yilmaz S, Ozcalik HR, Dogmus O, Dincer F, Akgol O, Karaaslan M. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015 Mar 1;43:997-1005.
15- Elmaged A, Kamal H. Passive solar tracking system (Doctoral dissertation, UOFK).
16- Fathabadi H. Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators. Renewable Energy. 2016 Sep 1;95:485-94.
17- Fathabadi H. Novel online sensorless dual-axis sun tracker. IEEE/ASME transactions on mechatronics. 2016 Sep 20;22(1):321-8.
18- Robles Algarin CA, Ospino Castro AJ, Naranjo Casas J. Dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems.
19- Smirnov AA, Malugin SA, Bakanov AV. Designing integrated PV facility with dual-axis solar tracking system mounted on the south building face. In2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2017 May 16 (pp. 1-4). IEEE.
20- Frankovic D, Kirincic V, Valentic V. A dual-axis tracking photovoltaic power plant as an educational tool. International Journal of Electrical Engineering Education. 2017 Jul;54(3):189-207.
21- Mostafa MT, Choudhury SM, Hosain S. Design and Performance Analysis of a Dual Axis Solar Tracker. In2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP) 2019 Jul 4 (pp. 1-4). IEEE.
22- Rosma IH, Asmawi J, Darmawan S, Anand B, Ali ND, Anto B. The implementation and analysis of dual axis sun tracker system to increase energy gain of solar photovoltaic. In2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI) 2018 Oct 16 (pp. 187-190). IEEE.
23- Yao Y, Hu Y, Gao S, Yang G, Du J. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. Renewable Energy. 2014 Dec 1;72:88-98.
24- Alexandru C. A novel open-loop tracking strategy for photovoltaic systems. The Scientific World Journal. 2013 Sep;2013.
25- Alexandru C. Simulation of a mechatronic dual-axis tracking system for PV panels. InApplied Mechanics and Materials 2017 (Vol. 859, pp. 81-87). Trans Tech Publications Ltd.
26- Jamroen C, Komkum P, Kohsri S, Himananto W, Panupintu S, Unkat S. A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020 Feb 1;37:100618.
27- FAKHARI V, MIRJALILI AS, inventors; Fakhari Vahid, assignee. Dual-axis solar tracker with hybrid control and possibility of full rotation. 2022 Apr 21.
28- Shigley JE, Mischke CR, Budnyas RG, Nisbett KJ. Shigley'S Mechanical Engineering Design (In Si Units),(Sie). Tata McGraw-Hill; 2008.
29- Juvinall RC, Marshek KM. Fundamentals of machine component design. John Wiley & Sons; 2020 Jun 23.
30- Global Monitoring Laboratory website
31- Sen Z. Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy. Springer Science & Business Media; 2008 Mar 28.

پیوست ها

پیوست الف-مشخصه‌های فنی اجزاء

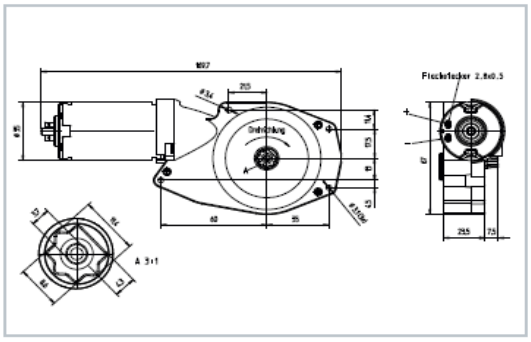
جدول ۳) مشخصات پنل خورشیدی

Specifications of ZT-60 PV module	
Parameter specifications	**Values**
Nominal Power (P_m)	**60 W**
Open circuit voltage (V_{oc})	**21.61 V**
Short-circuit current (I_{sc})	**3.70 A**
Voltage at max power (V_{mp})	**18.01 V**
current at max power (I_{mp})	**3.36 A**
Module efficiency	**12.83%**
Cells efficiency	**17.30%**
System voltage	**1000V**
Temp. coefficient V_{oc}	**-0.36 %/°c**
Temp. coefficient I_{sc}	**0.06 %/°c**
Temp. coefficient P_m	**-0.36 %/°c**
Operating temp.	**-40 to +85**

جدول ۴) مشخصات برد کنترلی

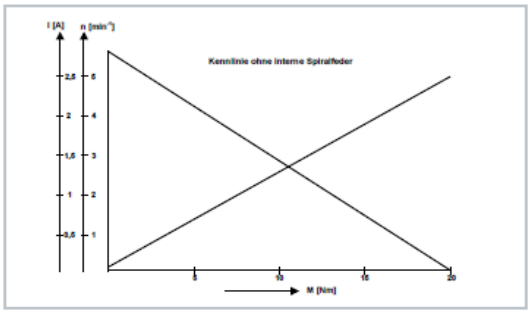
Microcontroller	Atmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage	7V – 12V
USB Port	Yes
DC Power Jack	Yes
Current Rating Per I/O Pin	20mA
Current Drawn from Chip	50mA
Digital I/O Pins	54
PWM	15
Analog Pins (Can be used as Digital Pins)	16 (Out of Digital I/O Pins)
Flash Memory	256KB
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Crystal Oscillator	16 MHz
LED	Yes/Attached with Digital Pin 13
Wi-Fi	No
Shield Compatibility	Yes

Spezial Getriebemotor **1.61.068.XXX**



Baureihe 1.61.068.			5XX
Betriebsspannung	U	V	13,5
Betriebsspannungsbereich	U	V	9 - 18
Leerlaufdrehzahl	n_o	min^{-1}	5,7
Leerlaufstrom	I_o	A	< 0,5
max. Dauerdrehmoment	M_{max}	Nm	7,5
Drehzahl	n_N	min^{-1}	3,5
Nennstrom	I_N	A	< 1,0
Verstellbereich		°	140
Umgebungstemperatur	T	°C	-40 - +95

bezogen auf 25 °C

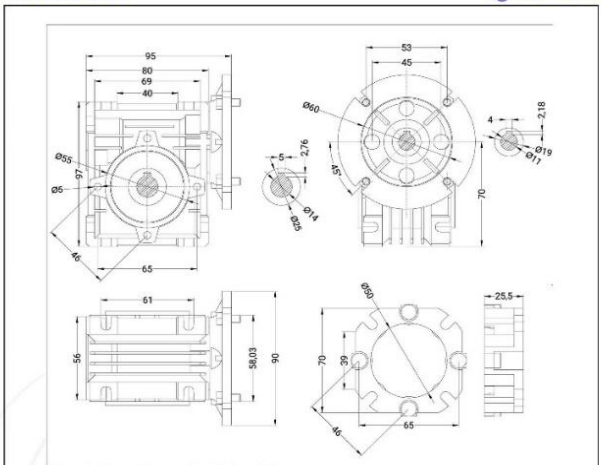


Zusatzfunktionen:
integrierte Feder zur Rückkehr in die Ausgangsposition
Überlastschutz im Motor integriert

شکل ۶) مشخصات موتور دی سی

Specification of Sahand Worm Gearbox W/30/63B14/50/11 **مشخصات فنی گیربکس مکعبی سهند**

Geometric data : اطلاعات هندسی:



General data : اطلاعات عمومی:

Gear material :	Brass alloy / آلیاژ برنج	جنس دنده :
Worm material :	Alloy steel / آلیاژ فولاد	جنس ماردون :
Shell material :	Aluminium / آلومینیوم	جنس پوسته :
Gearbox size :	30	سایز گیربکس :

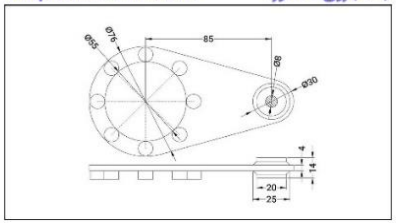
Technical data : اطلاعات فنی:

Ratio :	50	نسبت تبدیل :
Input flange :	B14 ✓ B5 □	نوع فلنج ورودی :
Input shaft diameter :	11 (mm)	قطر شافت ورودی :
Output shaft diameter :	14 (mm)	قطر شافت خروجی :

Electromotor data : اطلاعات الکتروموتور:

1500 rpm	1000 rpm	700 rpm	سرعت ورودی
30 (rpm)	20 (rpm)	14 (rpm)	سرعت خروجی
63	63	63	فریم الکتروموتور

Torque arm dimension : ابعاد بازوی گشتاور:

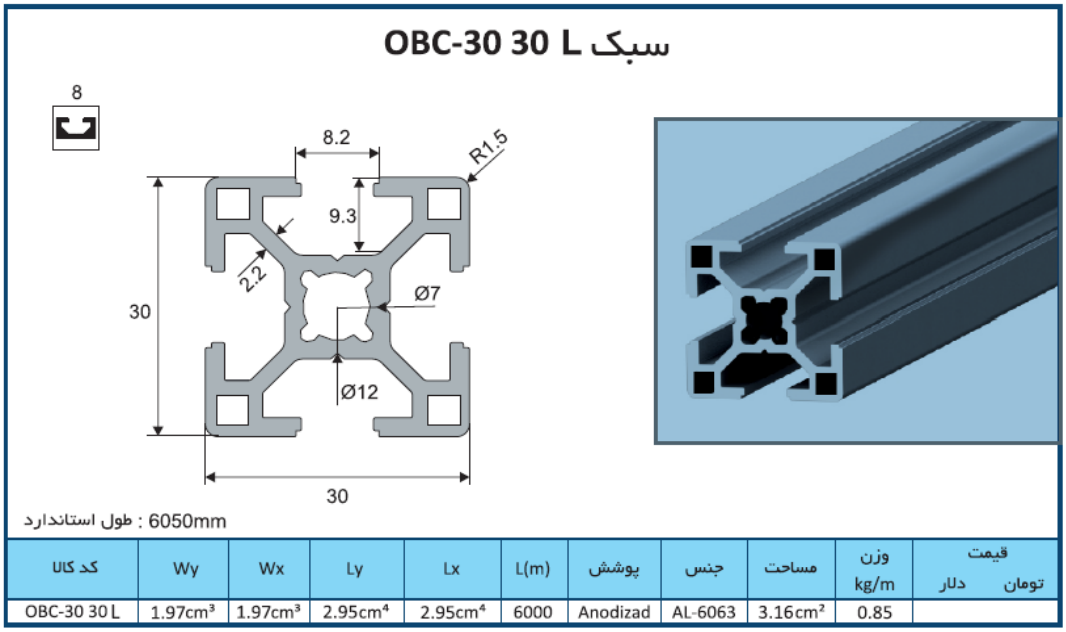


Accessories : تجهیزات جانبی :
- شافت خروجی به صورت سالید شافت
- فلنج بغل به صورت پایه بلند و پایه کوتاه
- بازوی گشتاور

فروشگاه کالا صنعتی www.kalasanati.com کالا صنعتی تنها یک فروشگاه نیست! آموزش، انتخاب، خرید

جهت دریافت مشخصات بیشتر با پشتیبانی مجموعه در تماس باشید

شکل ۷) گیربکس انتخاب شده



کد کالا	Wy	Wx	Ly	Lx	L(m)	پوشش	جنس	مساحت	وزن kg/m	قیمت تومان دلار
OBC-30 30 L	1.97cm³	1.97cm³	2.95cm⁴	2.95cm⁴	6000	Anodizad	AL-6063	3.16cm²	0.85	

شکل۸) مشخصات پروفیل بکار رفته

پیوست الف- مروری بر طرح‌های پیشین

جدول۳) ویژگی‌های طرح های پیشین ارائه شده برای ردیاب‌های خورشیدی دومحوره

طراح	نوع ردیاب دومحوره	الگوریتم کنترلی	تجربی یا شبیه‌سازی	امکان دوران کامل حول هر دو محور	نوع عملگر
عبدالله و نیجمه [۱۳]	آزیموث- الویشن	حلقه باز	تجربی	خیر	موتور دی‌سی
ارباب و همکاران [۶]	آزیموث الویشن	حلقه باز	تجربی	خیر	موتور دی‌سی
ایلماز و همکاران [۱۴]	آزیموث الویشن	حلقه بسته	تجربی	بله	-
نارن دارسین و همکاران [۱۵]	ردیاب غیر فعال	-	تجربی	خیر	-
فتح آبادی [۱۶]	آزیموث الویشین	حلقه باز	تجربی	بله	موتور دی‌سی چرخ دنده
روبلس و همکاران [۱۸]	قطبی	حلقه باز (شدت تابش)	تجربی	-	-
سمیرنو و همکاران [۱۹]	آزیموث الویشین	حلقه باز	شبیه‌سازی	بله	عملگر خطی
فرانکوویچ و همکاران [۲۰]	آزیموث الویشین	حلقه باز (شدت تابش)	تجربی	خیر	عملگر خطی
تحسین و همکاران [۲۱]	قطبی	حلقه باز (شدت تابش)	تجربی	بله	سروو موتور
هایسیم روسما و همکاران [۲۲]	قطبی	حلقه باز (شدت تابش)	تجربی	بله	سروو موتور
یائو و همکاران [۲۳]	قطبی	حلقه باز	تجربی	خیر	موتور دی‌سی و عملگر خطی
طرح اول الکساندرو [۲۴]	آزیموث الویشن	حلقه باز	تجربی	بله	موتور دی‌سی
طرح دوم الکساندرو [۲۵]	آزیموث الویشن	حلقه باز	شبیه‌سازی	خیر	موتور دی‌سی
جامروئن و همکاران [۲۶]	قطبی	حلقه باز	تجربی	بله	موتور دی‌سی - عملگر نیوماتیکی