



طراحی و ساخت دنبال کننده خورشیدی دقیق دومتوجه با توان مصرفی بسیار کم مبتنی بر آشکارسازهای جدید مکانیکی و الکترونیکی

سارنگ کاظمی نیا^{1*}، رضا عبدی بهنق²، میلاد کلبخانی³

1- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

3- دانشجو، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

* ارومیه، صندوق پستی 57155-419، s.kazeminia@uut.ac.ir

چکیده

در این مقاله دنبال کننده خورشیدی دومتوجه جدیدی ارائه می گردد که با توان مصرفی کم، به افزایش 60 درصدی در وات ساعت دریافتی سلول های خورشیدی در طول شبانه روز می انجامد. آشکارسازهای مکانیکی و الکترونیکی جدیدی برای حذف خطای زاویه ای انحراف نسبت به خورشید پیشنهاد شده اند که براساس آن، مجموعه دنبال کننده خورشیدی با توان مصرفی کم، ضریب اطمینان بالا و هزینه بسیار پائین قابل پیاده سازی است. جهت بهینه سازی فرآیند دریافت انرژی در تمام فصول سال، علاوه بر چرخش در راستای غربی-شرقی، امکان تغییر زاویه در راستای شمالی-جنوبی نیز پیش بینی و فراهم شده است. نتایج تست پس از ساخت نشان می دهد که با استفاده از آشکارسازهای مکانیکی و الکترونیکی پیشنهادی، توان متوسط مصرفی دو جک پیستونی با تحمل بار 2 کیلوگرمی ناشی از پیل 40 وات، به کمتر از 10 میلی وات در طول 13 ساعت روشنایی روز کاهش می یابد. دستگاه نیاز به منبع تغذیه بیرونی ندارد و توان مورد نیاز جهت چرخش پیل و عملکرد مدار کنترلی از باتری شارژ شده توسط خورشید تأمین می شود. با استفاده از طرح پیشنهادی، مجموع وات-ساعت دریافت شده از خورشید در طول روز تابستانی 60 درصد نسبت به حالت پیل ثابت افزایش می یابد. همچنین، درصد جریان متوسط مصرفی مجموعه دنبال کننده به جریان دریافتی پیل، به حدود 0.13 درصد بهبود یافته است. در فرآیند طراحی قطعات مکانیکی، که با استفاده از نرم افزار کتیا¹ انجام شده است، امکان تحمل وزن مجموعه ای از پیل های خورشیدی تا توان نامی 1200 وات وجود دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 اسفند 1396

پذیرش: 12 فروردین 1397

ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

سیستم های مکترونیکی

پیل خورشیدی

دنبال کننده خورشیدی

تعقیب کننده خورشیدی دومتوجه

انرژی های سبز

Design and Manufacturing of a Low-Power Dual-Axis Sun Tracker Based on Novel Mechanical and Electrical Detectors

Sarang Kazeminia^{1*}, Reza Abdi Behnagh², Milad Kalbkhani³

1- Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

3- Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

* P.O.B. 57155-419 Urmia, Iran, s.kazeminia@uut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 21 February 2018

Accepted 01 April 2018

Available Online 11 May 2018

Keywords:

Mechatronic Systems

Sun Tracker

Dual-Axis Sun Tracker

Green Energies

Renewable Energies

ABSTRACT

In this paper the conventional structure of dual-axis sun tracker is modified based on new mechanical and electrical detectors which are proposed to reduce both the angular error and power consumption. Automatic adjustment of the azimuth, latitude and altitude angle for the photovoltaic panels improves the performance of converting solar energy to the electrical energy, throughout all the seasons. In other words, both the north-worth and east-west angular error is continuously minimized until that the panel's surface is solarized with the maximum energy. Post-Fabrication results show that the proposed control circuit and two actuators consume the average power of less than 10mWatt alongside the 13-hour of a summer day. The external power source is no longer required because the received power is saved in a battery in order to provide the power of the control circuit. The ratio of the required energy to the saved energy is optimized to around 0.13%. Measurement results confirm that the total Watt-hour during a summer day is improved around 60 percent in comparison to the case that a fixed panel is used. Design of the mechanical objects are performed using CATIA software such that endure up to 1200Watt panel array.

1- مقدمه

فسیلی، علاوه بر تحمیل هزینه های استخراج و بهره وری، با کاهش سطح سلامت و افزایش آلودگی های زیست محیطی خسارات دیگری را به دنبال دارد که جبران آنها مستلزم گذشت زمان و هزینه گزاف خواهد بود، [1-2]. چالش اصلی در جایگزینی انرژی های فسیلی با انرژی پاک، راندمان کم در تبدیل

امروزه، استفاده از انرژی های پاک به علت محدودیت و آلودگی های منابع فسیلی، بطور ویژه در اولویت قرار گرفته است. تداوم استفاده از سوخت های

¹ CATIA

از تراشه‌های اپی‌جی‌ای⁵ قیمت تمام شده بیشتری نیز دارد. با توجه به موقعیت جغرافیایی کشورمان، و نوع چرخش زمین به دور خورشید، بیش از 20 درجه جابجایی در زاویه تابش شمالی-جنوبی خورشید در فصل زمستان اتفاق می‌افتد، [6]. بنابراین دنبال‌کننده‌های تک‌محوره پیشنهادی، [9-1]، در فصل زمستان که طول روز کوتاه‌تر است و همینطور زاویه تابش شمالی-جنوبی تغییر کرده است، دچار افت راندمان تبدیل انرژی می‌شوند. بنابراین نیاز به تغییر زاویه شمالی-جنوبی نیز احساس می‌شود. هرچند در نگاه اول این تغییر زاویه کم اهمیت جلوه می‌کند، اما با توجه به کوتاه شدن طول روز و زمان کمتر دسترسی به نور خورشید در فصل زمستان، جبران کاستی انرژی دریافتی بسیار حائز اهمیت است. نسل جدید دنبال‌کننده‌های خورشیدی، که به نام دنبال‌کننده دو محوره مشهور هستند، علاوه بر چرخش در راستای شرقی-غربی قادر هستند تغییرات زاویه‌ای در راستای شمالی-جنوبی را نیز دنبال کنند، [10-17]. بنابراین در فصل زمستان که خورشید کمی مایل‌تر به زمین می‌تابد، پنل خورشیدی با چرخش عمودی به سمت شمال و جنوب به گونه‌ای قرار می‌گیرد که حداکثر توان را از خورشید دریافت کند. ساختار دنبال‌کننده دو محوره پیشنهادی در [10]، بدون استفاده از سنسور و با تحلیل ریاضی توان خروجی تلاش می‌کند نقطه بهینه را بیابد. برای نقطه‌یابی بهینه، از رفتار مشتق عددی استفاده می‌شود که جهت صحیح حرکت پنل را با استفاده از افزایش یا کاهش لحظه‌ای توان دریافتی در حین چرخش تعیین کند. نیروی محرک توسط موتورهای پله‌ای تأمین می‌شود که برای پنل با ظرفیت‌های بزرگتر، از محدودیت توان نسبی قابل تحمل رنج می‌برد. محاسبات ممتد توان مصرفی در هر لحظه، و همچنین عملیات مشتق‌گیری و مقایسه بطور پیوسته، به توان مصرفی بزرگ بخش کنترلی در [10] می‌انجامد که به نوعی با هدف ذخیره انرژی در تضاد است؛ هرچند بعلاوه عدم استفاده از سنسور مشکلات ناشی از خطای سنسورها در این مکانیزم برطرف می‌شود. براساس تحلیل و مقایسه ارائه شده در [11]، مکانیزم‌های بدون سنسور، بین 10 تا 12 درصد راندمان کمتری در تبدیل انرژی نسبت حالت با سنسور دارند. افزایش راندمان دریافت انرژی در حالت بدون سنسور در فصل‌های مختلف سال به ترتیب بین 29 الی 44 درصد در [10] و بین 19 تا 30 درصد در [12] نسبت به حالت پنل ثابت گزارش شده است. همچنین، در مدت پیشنهادی با سنسور در [11]، بهبود 28 الی 40 درصدی در افزایش توان دریافتی بدست آمده است. در مکانیزم پیشنهادی در [13]، از سنسور فوتورزیست در یک تقسیم مقاومتی مستقیم استفاده شده است. ایراد این روش، آنست که مقدار مرکزی مقاومت‌ها برای عملکرد مناسب تقسیم ولتاژ باید در حد مقاومت خود فوتورزیست انتخاب شود. انتخاب مقاومت‌های کوچک در تقسیم ولتاژ، به معنای عبور جریان دائمی از مسیر تغذیه به زمین است. بخش کنترلی [13] بر اساس کنترلرهای پی‌ال‌سی⁶ ساخته شده است و در مجموع بهبود 42 درصدی در راندمان دریافت انرژی نسبت به حالت پنل ثابت ایجاد می‌کند. سایر مکانیزم‌های پیشنهادی برای دنبال‌کننده خورشیدی دوجوره، [14-17]، و همچنین تک محوره [18-24]، بهبود کمتر از 30 درصد را نسبت به حالت پنل-ثابت تجربه می‌کنند. در برخی از روش‌های دوجوره دیگر، [25]، با استفاده از دانش نجوم، از یک دیتابیس⁷ از پیش‌تعیین‌شده برای تعیین مسیر چرخش پنل استفاده شده است. علیرغم ساده‌شدن فرآیند پیاده‌سازی مجموعه و دستیابی به بهبود 46

انرژی‌های پاک به انرژی‌های مورد نیاز است. این مشکل کماکان توجیه مناسبی برای استفاده از سوخت‌های فسیلی فراهم می‌کند. بنابراین، مطالعه و بازنگری در متدهای تبدیل انرژی و تلاش برای افزایش راندمان در فرآیند تبدیل انرژی‌های پاک به انرژی‌های مطلوب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انرژی خورشیدی، یکی از در دسترس‌ترین انواع انرژی‌های پاک است که با توجه به موقعیت اقلیمی کشورمان، در اکثر استان‌ها گزینه مناسبی نسبت به سایر انرژی‌ها مثل انرژی باد، آب و ... به شمار می‌رود. تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی، توسط المانی به نام سلول خورشیدی انجام می‌شود که در ابتدا در سال 1954 در آزمایشگاه بل، با استفاده از پیوند پی-ان¹ در کریستال سیلیکون و با راندمان بسیار پائین 5 الی 6 درصد ساخته شد، [3]. با در نظر گرفتن تغییر موقعیت زمین نسبت به خورشید در طول روز، زاویه تابش نور خورشید به یک سطح صاف در حال تغییر است. واضح است که خورشید در ابتدای صبح در شرقی‌ترین و در انتهای روز در غربی‌ترین موقعیت نسبت به زمین قرار دارد، اما این تغییر موقعیت در طول روز در زاویه‌ای متمایل به سمت جنوب صورت می‌پذیرد. بنابراین، در ساده‌ترین نوع استفاده، بهتر است سلول خورشیدی بطور ثابت و در راستای نسبتاً جنوبی نصب شود تا در طول شبانه‌روز، در بازه زمانی بزرگتری تابش مستقیم نور خورشید را تجربه کند. از طرفی، چنانچه زاویه تابش خورشید کاملاً عمودی باشد، حداکثر توان از انرژی تابشی دریافت می‌گردد، [2-3].

ایده دنبال‌کننده خورشیدی²، در ابتدا با هدف اصلاح دائمی زاویه پنل خورشیدی در راستای عمود بر تابش، در سال 1962 توسط فینستر³ مطرح شد، [3]، که بصورت تمام مکانیکی کنترل می‌شد. یک سال بعد، ساودرا⁴ برای اولین بار مکانیزم الکتریکی اتوماتیک برای تعقیب راستای تابش خورشید پیشنهاد کرد. مهمترین چالش در مکانیزم کنترل اتوماتیک زاویه، بهینه‌سازی توان مصرفی بخش متحرک دنبال‌کننده خورشیدی است؛ به گونه‌ای که بهبود در راندمان شارژ و افزایش توان دریافتی در فرآیند تعقیب، در مقایسه با توان مصرفی لازم برای موتورهای و مدار کنترلی استفاده شده، توجیه‌پذیر باشد. آنچه بعنوان توان مطلوب مصرفی برای دنبال کردن خورشید مورد استناد قرار گرفته است، 2 تا 3 درصد توان ذخیره شده است، [3]. به همین منظور بهتر است دنبال‌کننده خورشیدی برای ابعاد بسیار بزرگتری از سطح پنل‌ها بکار برده شود. مطابق برخی نتایج ارائه‌شده، چنانچه 10 درجه اختلاف زاویه‌ای نسبت به راستای خورشید بوجود بیاید، پنل کماکان قادر است با بیش از 98.5 درصد توان نامی قابل دریافت از خورشید شارژ شود، [3-5]. در ساده‌ترین مکانیزم حلقه باز برای دنبال‌کننده‌های تک‌محوره، ثابت شده است که اگر در هر ساعت از روز پنل 7.5 درجه چرخش انجام دهد، بیش از 99.7 درصد توان نامی قابل دریافت در مسیر شرقی-غربی از خورشید دریافت خواهد شد، [5]. بر همین اساس، در [5] از یک برنامه کامپیوتری از پیش‌تعیین‌شده برای تعیین مسیر چرخش استفاده شده است که از تمام معایب سیستم‌های حلقه باز رنج می‌برد. به عبارت دیگر، در اثر تغییرات ناگهانی و یا هرگونه از دست رفتن داده ذخیره شده در حافظه، دستگاه کارایی خود را از دست خواهد داد و نیازمند تنظیم مجدد است. در نسل‌های اصلاح-شده حلقه بسته، [6]، متد فازی برای تشخیص و بهینه‌سازی عملکرد دنبال-کننده پیشنهاد شده است که علاوه بر پیچیدگی در پیاده‌سازی، بعلاوه

⁵ FPGA⁶ PLC⁷ Database¹ P-N Junction² Sun Tracker³ Finster⁴ Saavedra

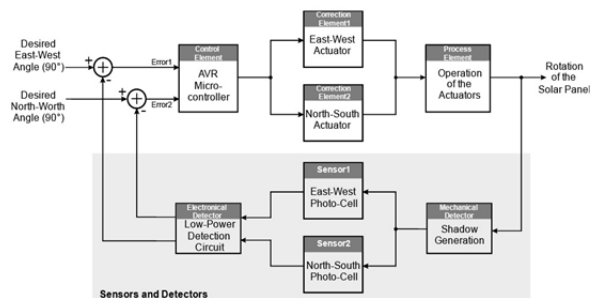


Fig. 1 Architectural description of the closed loop structure for dual-axis sun-tracker

شکل 1 توصیف معماری حلقه بسته برای دنبال کننده دوجوره خورشید

که با افزایش شدت نور، مقاومت آن کاهش می‌یابد. این سنسورها علاوه بر قیمت بسیار پائین، عمر طولانی دارند. بنابراین می‌توان آرایه‌ای از این سنسورها را با قیمت تمام شده بسیار پائین استفاده نمود.

استفاده از فوتوسل‌ها بصورت آرایه‌ای در هر سنسور، دو مزیت عمده دارد: اول، حساسیت و میزان تغییرات مطلق مقاومت سنسور در پاسخ به تغییرات شدت نور محیط چند برابر می‌شود؛ دوم، مقدار مطلق مقاومت سنسور افزایش یافته و طراحی مدار آشکارساز الکترونیکی با توان مصرفی کمتر را تسهیل می‌کند. افزایش مقاومت معادل با هدف کاهش توان مصرفی است. آشکارساز مناسب در خروجی سنسورها، به عنوان یکی از مهمترین اجزای سازنده سیستم حلقه بسته مکانیکی شناخته می‌شود که به تقویت و شفاف سازی کیفیت سیگنال خروجی سنسور کمک می‌کند، [26]. استفاده از مدار آشکارساز مکانیکی چند مزیت عمده به همراه دارد:

- تغییر شدت نور را با بهره بزرگی تقویت می‌کند تا تأثیرات نویز احتمالی محیط بر مدار سنسور کاهش یابد.
- تا زمانی که زاویه بصورت دقیق تنظیم نشود، خطای زاویه‌ای را به شدت تقویت می‌کند.
- امکان استفاده از فوتوسل‌های ارزان قیمت را با افزایش حساسیت به زاویه تابش فراهم می‌کند

با وجود عملکرد مطمئن آشکارساز مکانیکی در حذف نویز و اثرات لحظه ای محیط، طبقه آشکارساز دیگری جهت افزایش ضریب اطمینان عملکرد مجموعه اضافه شده است که تغییرات مقاومت الکتریکی در خروجی آشکارساز مکانیکی را با بهره بزرگی به تغییرات ولتاژ تبدیل می‌کند. عملکرد دقیق هر دو آشکارساز در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

2-1- آشکارساز مکانیکی پیشنهادی و ملاحظات طراحی

هدف از آشکارساز مکانیکی، بزرگنمایی خطای زاویه‌ای با ایجاد سایه بر روی سنسورهای تشخیص نور است. شکل 2 شماتیک آشکارساز مکانیکی پیشنهادی را نمایش می‌دهد که به منظور کاهش وزن و مقاومت در برابر تغییرات رطوبت محیط از جنس پلکسی ساخته شده است. این آشکارساز از یک شاخص⁶ در وسط تشکیل شده که کاملاً عمود بر پنل نصب می‌شود. چهار سنسور تشخیص شدت نور، در چهار سوی شاخص تعبیه شده‌اند که در صورت عمود نبودن راستای تابش خورشید بر سطح پنل، حداقل یکی از آنها در معرض سایه قرار خواهد گرفت. طراحی اولیه قطعه پیش از ساخت، در زوایای مختلف در شکل 2(a) دیده می‌شود. همچنین، شکل آشکارساز پس از ساخت در شکل 2(b) قابل مشاهده است. مقدار مطلق ابعاد آشکارساز اهمیت

درصدی در راندمان دریافت انرژی، سیستم پیشنهادی در [25] از حالت حلقه بسته خارج شده و در صورت بروز هر اتفاق خارجی که تنظیم اولیه پنل را برهم بزند، بازگشت به حالت صحیح امکان پذیر نخواهد بود.

در این مقاله، ایده جدیدی بر اساس بکارگیری دو آشکارساز مکانیکی¹ و الکترونیکی² در دنبال کننده خورشیدی دوجوره ارائه می‌گردد که علاوه بر کاهش چشمگیر توان مصرفی بخش متحرک، خطای انحراف زاویه‌ای را تقریباً به صفر کاهش می‌دهد. این آشکارساز، با مقاوم بودن در برابر تغییرات لحظه ای و کاذب شدت نور محیط، از ارسال دستورات غلط به موتورها و چرخش نادرست آنها، جلوگیری کرده و صرفه جویی قابل توجهی در توان مصرفی را به دنبال دارد. از طرفی، مدار الکترونیکی ساده‌ای جهت تبدیل سیگنال‌های خروجی آشکارساز به سیگنال‌های کنترلی قابل استفاده در میکروکنترلر ارائه می‌گردد که علاوه بر پیاده سازی با قیمت بسیار کم، در مقابل نویز و سایر تغییرات نامطلوب محیط، بسیار مقاوم رفتار می‌کند. تلفیق آشکارساز و مدار الکترونیکی پیشنهادی، چرخش موتور در جهت درست را تضمین می‌کند. سیستم پیشنهادی بصورت حلقه بسته بوده و بعلت بهره‌مندی از فیدبک، قادر است با هر شرایط اولیه، در هر موقعیت جغرافیایی و همچنین در صورت بروز هرگونه خطای غیرقابل پیش بینی، مجدداً به حالت عملکرد صحیح بازگردد. در بخش اول مقاله، ساختار حلقه بسته دنبال کننده دوجوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس، آشکارساز مکانیکی پیشنهادی، در بخش دوم معرفی می‌گردد. بخش سوم به معرفی مدار الکترونیکی پیشنهادی منطبق با آشکارساز مکانیکی اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج تست پس از ساخت ارائه شده و در بخش پنجم، از طرح پیشنهادی نتیجه گیری می‌شود.

2-2- توصیف ساختاری³ سیستم حلقه بسته⁴

شکل 1، توصیف ساختاری سیستم حلقه بسته دنبال کننده خورشیدی را نمایش می‌دهد. بلوک‌های تشکیل دهنده عبارتند از: المان مقایسه، المان کنترل، المان تصحیح، المان فرآیند، حسگر تشخیص زاویه، آشکارساز مکانیکی، و آشکارساز الکترونیکی، که مطابق ساختار متداول سیستم حلقه بسته مکانیکی نمایش داده شده‌اند، [26]. المان مقایسه، زاویه پنل در دو راستای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی را با مقدار مطلوب 90 درجه مقایسه کرده و بر اساس نتیجه مقایسه، دو سیگنال خطا به المان کنترل اعمال می‌کند (برای سادگی، انجام عملیات مقایسه نیز در داخل میکروکنترلر انجام می‌شود). خروجی‌های المان‌های مقایسه با فرض اینکه از مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال داخلی میکروکنترلر استفاده شود، سیگنال‌های دیجیتال هستند که جهت تصمیم‌گیری به المان کنترل وارد می‌شوند. میکروکنترلر ای‌وی‌آر⁵ به عنوان المان کنترل، سیگنال‌های خروجی مبدل داخلی خود را ارزیابی می‌کند. براساس کد دیجیتال تولید شده در داخل میکروکنترلر، به دو المان تصحیح یعنی موتور شرقی-غربی و موتور شمالی-جنوبی دستور چرخش داده می‌شود. خروجی المان فرآیند، چرخش موتورها در جهت اصلاح زاویه پنل است. چرخش پنل خورشیدی، توسط یک آشکارساز مکانیکی و آرایه‌ای از سنسورها شناسایی می‌شود و نتیجه به مدار آشکارساز الکترونیکی اعمال می‌شود. آشکارساز الکترونیکی انحراف از زاویه مطلوب را برای استفاده در المان مقایسه آشکار می‌سازد. برای سنسور شدت نور، از فوتوسل استفاده شده است

¹ Mechanical Detector

² Electronical Detector

³ Architectural Description

⁴ Closed-Loop

⁵ AVR Microcontroller

⁶ indicator

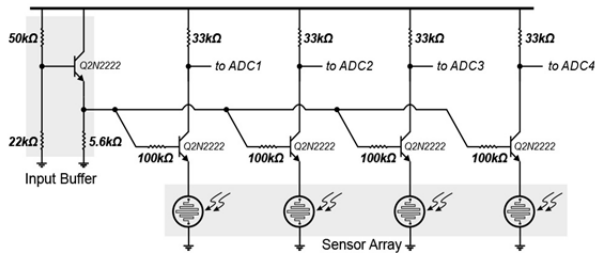


Fig. 3 Bipolar low-power detector circuit

شکل 3 آشکارساز الکترونیکی کم مصرف با استفاده از ترانزیستورهای بایپلار

3-2- تحلیل تئوری و ملاحظات طراحی مدار آشکارساز

برای طراحی، مدار یکی از سنسورها را مطابق شکل 4 در نظر بگیرید که در آن مقاومت سنسور با R_{Sensor} مدل شده باشد. مرز عملکرد ترانزیستور در دو ناحیه اشباع و اکتیو آنست که اختلاف ولتاژ کلکتور-امیتر از مقدار مرزی ناحیه اشباع کمتر شود، [27]:

$$V_{CE} < V_{CE,sat} \quad (1)$$

که منظور از $V_{CE,sat}$ ولتاژ کلکتور-امیتر در مرز اشباع و اکتیو است. با فرض نامگذاری ولتاژ تغذیه به V_{CC} ، ولتاژ کلکتور-امیتر ترانزیستور در رابطه (2) محاسبه شده است:

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_{CC} - I_C \left[R_C + R_{\text{Sensor}} \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) \right] \quad (2)$$

که جریان‌های امیتر و کلکتور به ترتیب با I_E و I_C نمایش داده شده‌اند. β بیانگر ضریب تقویت جریان در ترانزیستور بایپلار است. جریان بیس ترانزیستور مسیر خروجی، از طریق ولتاژ گر x قابل محاسبه است:

$$I_B = \frac{V_X - V_{BE,on}}{R_B + (\beta + 1)R_{\text{Sensor}}} = \frac{\left[V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE,on} \right] - V_{BE,on}}{R_B + (\beta + 1)R_{\text{Sensor}}} \quad (3)$$

که ولتاژ لازم برای روشن شدن پیوند بیس-امیتر $V_{BE,on}$ ، و جریان بیس ترانزیستور خروجی با I_B نمایش داده شده‌اند. از آنجا که β برای ترانزیستورهای بایپلار مدل 2N2222 به حدود 250 می‌رسد، بنابراین مقداری بسیار بزرگتر از یک است و می‌توان در روابط (2) و (3) از تقریب $\beta + 1 \approx \beta$ استفاده کرد. با تبدیل جریان بیس به جریان کلکتور در مرز اشباع، و جایگزینی رابطه (2) در (3) داریم:

$$[V_{CE}]_{sat-lin} \cong V_{CC} - (R_C + R_{\text{Sensor}}) \left[\frac{V_{CC} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) - 2V_{BE,on}}{R_{\text{Sensor}} + \frac{R_B}{\beta}} \right] \quad (4)$$

با توجه به اینکه مقاومت فوتوسل (R_{Sensor}) در حالت روشن و خاموش به ترتیب مقادیر تقریبی 90 اهم و 300 اهم است، طراحی مدار برای این مقادیر کوچک ممکن است به توان مصرفی بزرگ در مدار کنترلی بینجامد. در ابتدا با هدف کاهش توان مصرفی در مدار کنترلی، هر سنسور شدت نور بصورت آرایه‌ای از هشت فوتوسل بصورت سری ساخته می‌شود. هدف دیگر از ساختن این سنسورها بصورت آرایه‌ای، کاهش خطای عدم تطابق سنسورهاست. در نظر بگیرید که مشخصات هر سنسور با دیگری اندکی متفاوت است. چنانچه تعداد بیشتری از این فوتوسل‌ها در یک سنسور بصورت سری قرار گیرند و مقاومت مجموع آنها در طراحی لحاظ شود، از مقاومت تمام قطعات انتگرال‌گیری می‌شود و بنابراین خطای عدم تطابق آنها بعلمت میانگین‌گیری تلطیف می‌شود. در نهایت با دو هدف، هر سنسور بصورت آرایه‌ای از هشت فوتوسل ساخته می‌شود: اول، پیاده‌سازی بخش الکترونیکی با توان مصرفی کمتر و دوم، تلطیف

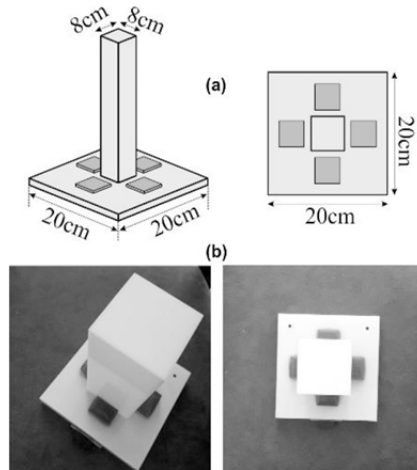


Fig. 2 Mechanical detector and sensor arrangement (a) before and (b) after fabrication.

شکل 2 آشکارساز مکانیکی و چینش سنسورها، (الف) قبل و (ب) بعد از ساخت.

چندانی ندارد؛ اما هرچه ارتفاع شاخص بیشتر باشد، سایه بزرگتری ایجاد کرده و دقت تنظیم زاویه پنل بیشتر خواهد بود. مکانیزم آشکارسازی زاویه بدین‌گونه است:

- حالت آرامش: هیچ سایه‌ای روی سنسورها نمی‌افتد و شاخص در راستای کاملاً عمود بر تابش خورشید قرار گیرد. در این حالت پنل مقدار بیشینه انرژی را از خورشید دریافت می‌کند.
- حالت تعقیب: زاویه پنل عمود بر راستای تابش خورشید نیست و سایه شاخص بر روی حسگر می‌افتد. در این حالت آشکارساز الکترونیکی در جهت اصلاح زاویه، فرمان مناسب صادر می‌کند.

2-2- آشکارساز الکترونیکی پیشنهادی

شکل 3 شماتیک مدار آشکارساز الکترونیکی را نمایش می‌دهد که با استفاده از ترانزیستورهای بایپلار موجود در بازار با قیمت بسیار پایین طراحی شده‌است. طراحی به گونه‌ایست که:

- هنگام تابش مستقیم نور خورشید، مقاومت فوتوسل کاهش می‌یابد، [26]. با توجه به قرارگرفتن فوتوسل در امیتر ترانزیستور بایپلار، کاهش مقاومت فوتوسل به معنای افزایش جریان بیس است، [27]. این افزایش جریان با بکاربردن قانون ولتاژ حلقه در حلقه ورودی شامل پیوند بیس-امیتر مطابق رابطه (3) قابل اثبات است. بنابراین، ترانزیستور بایپلار به ناحیه اشباع می‌رود. در این شرایط، ولتاژ نود خروجی به سمت ولتاژ زمین، با اندکی اختلاف، کاهش می‌یابد.
- چنانچه سایه بر روی فوتوسل بیفتد، مقاومت آن افزایش می‌یابد. بعلمت افزایش مقاومت امیتر و محدود شدن جریان بیس، ترانزیستور به ناحیه اکتیو بر می‌گردد، [27]. در این شرایط ولتاژ خروجی به سمت ولتاژ تغذیه، با مقداری افت، حرکت می‌کند.
- با توجه به استدلال فوق، فوتوسل‌ها مطابق شکل 3 در امیتر ترانزیستور بایپلار قرار می‌گیرند. به منظور تأمین جریان بیس ترانزیستورها در ناحیه اشباع، از یک طبقه بافر در ابتدا استفاده شده‌است. تحلیل تئوری ساده‌ای برای تعیین میزان مقاومت‌ها ارائه می‌گردد که تغییر ناحیه کاری ترانزیستور از اشباع به اکتیو و برعکس را با حاشیه امنیت مناسبی تضمین می‌کند.

شکل 6(b) ولتاژ نود خروجی به حدود 2.2 ولت می‌رسد. پس از برطرف شدن سایه، مقاومت سنسور کاهش یافته و ترانزیستور به ناحیه اشباع می‌رود، که در این شرایط جریان کلکتور ترانزیستور به مقدار بیشتر از 140 میکروآمپر رسیده و ولتاژ نود کلکتور به کمتر از 0.3 ولت کاهش می‌یابد. این شرایط نیز در هر دو رفتار شکل 6(a) و 6(b) با نام "ناحیه نور" و "ناحیه سایه" مشخص شده است.

در این شبیه‌سازی، زمان‌بندی سایه و نور تعداد کمی تغییر یافته تا در زمان کمتر شبیه‌سازی، قابل نمایش و رؤیت در شکل موج باشد.

4-2- مدار کنترل شارژ باتری

با توجه به تأثیر رفتار شارژ و دشارژ باتری‌های یوپی‌اس در سلامت آنها، نیاز به یک مدار کنترل شارژ باتری است که اجازه تخلیه باتری به کمتر از یک حد بحرانی پائین و همچنین اجازه شارژ به بیشتر از حد بحرانی بالا داده نشود. به همین منظور مدار کنترل شارژ باتری طراحی شده است. برای اطلاع به کاربر جهت عیب‌یابی، چراغ‌های نمایشگر مدار کنترل شارژ نیز در بیرون تعبیه شده‌اند که میزان شارژ باتری را نمایش دهند. مدار کنترل شارژ پس از ساخت در شکل 7 نمایش داده شده است. برای تشخیص سطح ولتاژ باتری از یک مقایسه‌کننده ولتاژ استفاده شده است. شکل 8 شمای مدار طراحی شده کنترلر حلقه بسته و همچنین مدار کنترل شارژ باتری را با نرم-افزار آلتیوم نشان می‌دهد.

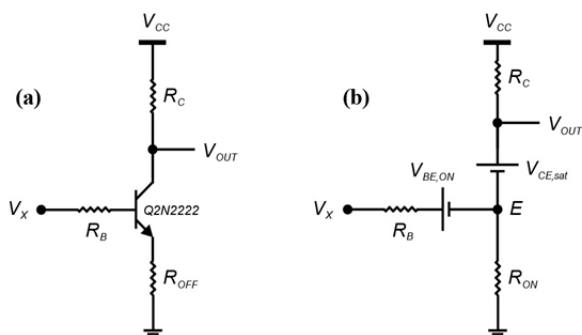


Fig. 5 The simplified model of detector circuit in (a) active, and (b) saturation region of bipolar transistors.

شکل 5 مدل ساده شده مدار آشکارساز الکترونیکی در نواحی کاری (الف) فعال، و (ب) اشباع ترانزیستور بایپلار.

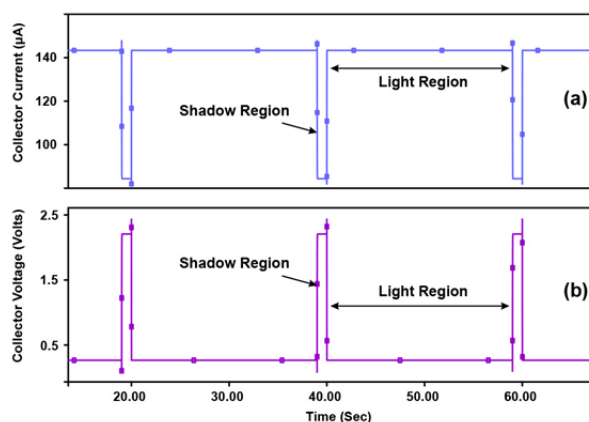


Fig. 6 Transient behavior of the proposed circuit in response to shadow and light. (a) collector current, and (b) collector voltage.

شکل 6 پاسخ گذرای مدار پیشنهادی در معرض نور و سایه، (الف) جریان کلکتور، و (ب) ولتاژ کلکتور به عنوان ولتاژ خروجی.

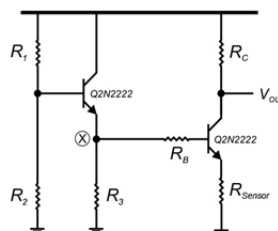


Fig. 4 Simple model for theoretical analysis of the sensing circuit.

شکل 4 مدل مداری ساده برای تحلیل تئوری آشکارساز الکترونیکی

خطای عدم تطابق سنسورها. مقاومت هر آرایه سنسور در حالت روشن و خاموش به ترتیب به مقادیر 720 و 2400 اهم می‌رسد. برای بهترین طراحی، مقدار میانی این دو مقاومت برای رابطه (4) مورد استفاده قرار می‌گیرد تا تضمین شود ترانزیستورها در حالت روشن و خاموش بودن محیط به ترتیب در نواحی اشباع و اکتیو قرار گیرند.

با فرض: $R_2=22k\Omega$, $R_1=50k\Omega$, $V_{BE,on}=0.65\text{Volts}$, $V_{CC}=5\text{Volts}$, $R_C=33k\Omega$, $V_{CE,sat}=0.2\text{Volts}$, $\beta=200$, $R_B=100k\Omega$ مقدار مرکزی R_{Sensor} حدود $1.13k\Omega$ بدست می‌آید که تقریباً در وسط رنج مورد نظر قرار گرفته است. از آنجا که قرار است سیگنال خروجی آشکارساز الکترونیکی، به مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال داخل میکروکنترلر اعمال شوند، باید در دو حالت سایه و روشن، اختلاف قابل قبولی بین ولتاژهای خروجی ایجاد شود. دو مدار شکل 5(a) و 5(b)، به ترتیب مدل ساده شده برای ناحیه کار فعال و اشباع ترانزیستور را نمایش می‌دهند. روابط تئوری برای محاسبه ولتاژ خروجی مدار در نواحی فعال و اشباع به ترتیب در (5) و (6) آمده‌اند:

$$\begin{cases} V_{OUT} = V_{CC} - R_C \beta \left[\frac{V_X - V_{BE,ON}}{R_B + (\beta + 1)R_{OFF}} \right] \\ V_X = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE,on} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{V_{OUT} - V_{CE,sat}}{R_{ON}} = \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{R_C} + \frac{V_X - (V_{OUT} - V_{CE,sat} + V_{BE,ON})}{R_B} \\ V_X = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - V_{BE,on} \end{cases} \quad (6)$$

با حل معادلات فوق، ولتاژ خروجی برای حالت روشنایی محیط حدوداً 0.35 ولت و برای حالت سایه حدوداً 2.4 ولت بدست می‌آید. این اختلاف ولتاژ خروجی برای حالت‌های مختلف، حاشیه امنیت مناسبی برای اعمال ولتاژ به مبدل آنالوگ به دیجیتال داخل میکروکنترلر ایجاد می‌کند. بر اساس کد بدست آمده در خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال، افتادن سایه بر روی هریک از سنسورها تشخیص داده می‌شود. تفاوت روش پیشنهادی با روش تقسیم مقاومت معمولی ارائه شده در [13]، توان مصرفی بسیار پایین است؛ زیرا در حالت تقسیم مقاومتی ساده نیاز به استفاده از مقاومت‌های کوچک در حد میانگین مقاومت‌های روشن و خاموش سنسور احساس می‌شود که به معنای ایجاد مسیر کم مقاومت از تغذیه به زمین و مصرف توان بزرگتر است.

تحلیل ولتاژ نود خروجی برای مدار ترانزیستوری شامل سنسورهای تشخیص شدت نور، نتایج تقریبی تحلیل تئوری را تأیید می‌کند. تفاوت اندکی که در نتیجه شبیه سازی شکل 6 مشاهده می‌شود، ناشی از تغییرات ولتاژ بیس-امیتر ترانزیستورهای بایپلار در مرز روشن شدن است که در تحلیل تئوری حدود 650 میلی‌ولت در نظر گرفته شده است. شکل 6(a) جریان کلکتور ترانزیستورهای متصل به سنسور را برای حالت سایه و نور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هنگام قرار گرفتن سنسور در سایه، جریان کلکتور ترانزیستور به کمتر از 85 میکروآمپر کاهش یافته است. در این حالت مطابق

دارد. به علت سبک بودن نسبی پنل خورشیدی، جک پیستونی نیازی به درایو شدن توسط ولتاژ 18 ولت ندارد و براحتی با ولتاژ 12 ولت خروجی باتری می‌تواند عملیات چرخش را برای پنل متحرک 1200 وات نیز به عهده بگیرد. افزایش ظرفیت پنل با افزایش ارتفاع پایه، بزرگتر کردن رویه مربوط به پنل، بزرگتر کردن کفی نگهدارنده و چینش تعداد بیشتری از پنل‌ها تا ظرفیت 1200 وات امکان پذیر است. شکل 10 نیز نمونه ساخته شده دستگاه دنبال کننده دومحوره خورشید را نشان می‌دهد که در آن مدار کنترل شارژ به همراه باتری نیز قابل مشاهده است.

3-1- پاسخ دستگاه در شرایط ارزیابی عملی

در اولین ارزیابی، زاویه پنل در تست‌های مکرر بصورت دستی نسبت به راستای خورشید تغییر داده شد و نسبت توان دریافتی از پنل به بیشینه توان قابل دریافت محاسبه گردید. زاویه صفر، بیانگر حالتی است که پنل عمود بر راستای خورشید باشد که در این حالت، جهت شاخص بطور دقیق به راستای خورشید اشاره دارد. به عبارت دیگر، محور افقی بیانگر زاویه بین راستای شاخص و راستای تابش خورشید است. محور عمودی بیانگر نسبت توان دریافتی به بیشینه توان قابل دریافت پنل از خورشید است. نتایج این ارزیابی در شکل 11 مشاهده می‌گردد که نسبت توان دریافتی به توان مطلوب، مطابق انتظار وابستگی شدیدی به زاویه تابش دارد. مطابق گزارش ارائه شده در [5]، انتظار می‌رود که در صورت انحراف کمتر از 10 درجه نسبت به راستای دقیق، هنوز بیش از 97 درصد توان بیشینه از خورشید دریافت می‌گردد. در شرایطی که زاویه بین شاخص و راستای تابش به 60 درجه می‌رسد، پنل کمتر از 20 درصد بیشینه توان قابل دریافت را از خورشید دریافت می‌کند.

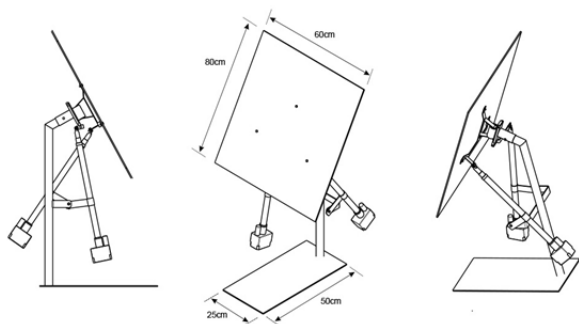


Fig. 9 Pre-Fabrication design of the sun tracker set in CATIA software.

شکل 9 طراحی پیش از ساخت دستگاه دنبال کننده خورشیدی دومحوره با استفاده از نرم افزار کتیا.



Fig. 10 Fabricated dual-axis sun-tracker under test conditions.

شکل 10 دنبال کننده خورشیدی دومحوره ساخته شده در شرایط تست و ارزیابی.

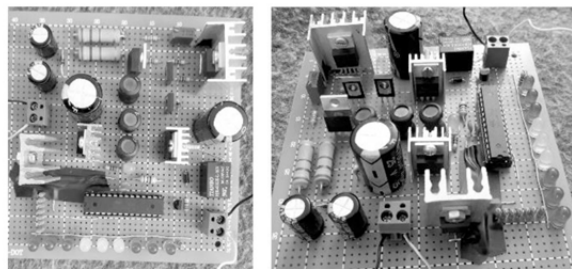


Fig. 7 Charge control circuit in order to protect the battery health.

شکل 7 مدار کنترل شارژ برای حفظ سلامت باتری.

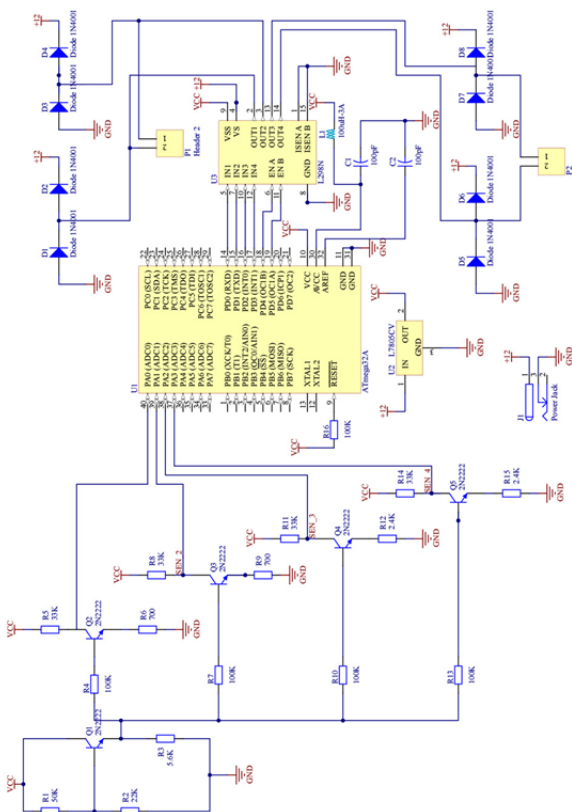


Fig. 8 The schematic of electronic controller of the closed-loop structure and the charge controller circuit in Altium Designer software.

شکل 8 شماتیک کامل بخش الکترونیکی شامل کنترلر حلقه بسته و کنترلر شارژ باتری در نرم افزار آلتیوم.

3- نتایج تست عملی پس از ساخت

برای نگهداری بخش ثابت و حفظ تعادل در هنگام چرخش بخش متحرک، به یک پایه نگهدارنده نیاز است که با وزن و پایداری مناسب، به عملکرد صحیح دستگاه کمک کند. برای ارزیابی عملکرد دستگاه، در نسخه اولیه یک پنل 40 وات مورد استفاده قرار گرفت تا میزان دریافت انرژی و تلف توان ناشی از چرخش موتورها محاسبه شود. شکل 9 شماتیک کامل دستگاه را پس از طراحی توسط نرم افزار کتیا نمایش می‌دهد. یک پایه فولادی با ارتفاع 75 سانتی متر که متکی بر یک کفه فولادی 25 سانتی متر در 50 سانتی متر است، ساخته شد تا جک‌های پیستونی از یک طرف به این پایه به عنوان ثابت نگهدارنده و از طرف دیگر به پنل متحرک متصل شوند. بخش متحرک، شامل یک رویه نگهدارنده و یک پنل متصل به آن است که با اتصال به هردو جک پیستونی، قابلیت چرخش در چهار راستای شمالی-جنوبی و شرقی-غربی را

و جک‌های پیستونی نیز محاسبه شده و از کل توان ذخیره شده کسر گردد. به همین منظور، جریان متوسط مصرفی برای مدار کنترلی و همچنین جک‌های پیستونی بطور جداگانه مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند.

نتایج شبیه‌سازی جریان لحظه‌ای مصرفی مدار آشکارساز الکترونیکی شکل 3 در حالت مصرف حداکثری در طول روز تابستانی در شکل 13(a) ارائه شده است. شرایط به گونه‌ای در شبیه‌سازی لحاظ شد که مطابق اتفاق عملی، تقریباً هر 15 دقیقه یک‌بار یکی از ترانزیستورها از حالت اشباع به حالت اکتیو برود و زمان شبیه‌سازی دربرگیرنده 12.5 ساعت کاری باشد. بنابراین در اکثر مواقع ترانزیستورها در حالت اشباع هستند که حداکثر توان به مجموعه تحمیل می‌شود. جریان متوسط مصرفی مطابق شکل 13(b) به مقدار حداکثر 750 میکروآمپر می‌رسد که با در نظر گرفتن ولتاژ تغذیه 5 ولت برای مدار کنترلی به معنای مصرف 3.75 میلی‌وات توان مصرفی متوسط است. مصرف جریان 750 میکروآمپر بصورت متوسط، در شرایطی که پنل در حال شارژ باتری با جریان متوسط حدود 1.2 آمپر باشد، به معنای مصرف 0.0625 درصدی توان دریافتی از خورشید برای مدار کنترلی است.

هر یک از جک‌های پیستونی هنگام چرخاندن مجموعه پنل، حدود 700 میلی‌آمپر جریان نیاز دارد. جک شمالی-جنوبی در طول روز جابجایی نخواهد داشت و تنها در درازمدت (طول یک ماه یا یک فصل) ممکن است اندکی جابجا شود. بنابراین توان مصرفی متوسط جک شمالی-جنوبی در طول شبانه روز بسیار ناچیز و نزدیک به صفر خواهد بود. در مقابل، جک شرقی-غربی در طول 13.5 ساعت روشنایی روز، باید حدود 135 درجه را طی کند. از آنجا که مطابق نمودار شکل 11 به ازای 5 درجه انحراف از زاویه مطلوب، تغییر محسوسی در توان دریافتی از خورشید اتفاق نمی‌افتد، ارتفاع شاخص به گونه‌ای تنظیم شده است که تا کمتر از 2.5 درجه انحراف زاویه‌ای، سایه‌ای روی سنسورها ایجاد نشود. بطور منظم حدود هر 15 دقیقه، 2.5 درجه جابجایی زاویه‌ای در پنل اتفاق می‌افتد، و هر بار جبران این خطا حدود 1 ثانیه طول می‌کشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت جریان متوسط مصرفی توسط جک پیستونی شرقی-غربی از تقسیم جریان لحظه‌ای بر نسبت زمان چرخش بر زمان سکون بدست می‌آید:

$$I_{\text{Average}} = I_{\text{Peak}} \times \frac{T_{\text{ON}}}{T_{\text{OFF}} + T_{\text{ON}}} = 700\text{mA} \times \frac{1\text{sec}}{902\text{sec}} \approx 0.775\text{mA} \quad (7)$$

نتیجه می‌شود آمپرساعت مصرفی متوسط جک پیستونی، 902 برابر کمتر از جریان لحظه‌ای است که در لحظه چرخش پنل صرف می‌گردد. برای محاسبه

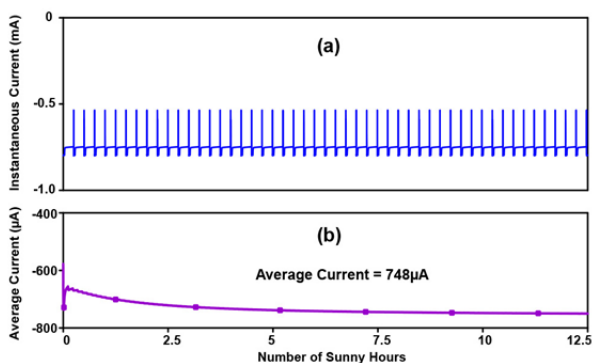


Fig. 13 (a) Instantaneous current, and (b) average current consumption of the circuit of Fig. 3 during whole the sunny hours of a summer day.

شکل 13 (a) جریان مصرفی لحظه‌ای، و (b) جریان مصرفی متوسط مدار آشکارساز الکترونیکی شکل 3 در تعداد ساعات روشن روز کامل تابستانی.

در آزمون دیگر، دستگاه در حالت تنظیم اتوماتیک ارزیابی شد و به جک‌های پیستونی اجازه داده شد تا پنل را در راستای دریافت حداکثر توان از خورشید قرار دهند. نتایج این تست، بر حسب ساعت تست در طول یک روز تابستانی در نمودار شکل 12 با رنگ آبی به تصویر کشیده شده است. برای راحتی مقایسه، نتایج تست پنل ثابت نیز بر حسب ساعت روز در همین نمودار با رنگ قرمز تجمیع شده‌اند. مشابه نمودار شکل 11، محور عمودی بیانگر نسبت توان دریافتی به بیشینه توان قابل دریافت توسط پنل است.

مشاهده می‌گردد که در حالت پنل متحرک، در بیش از 8 ساعت شبانه روز بیشتر از 90 درصد توان مطلوب پنل دریافت می‌گردد. در حالی که این توان در حالت پنل ثابت در کمتر از 2.5 ساعت قابل دریافت است. همچنین، در حالت پنل ثابت، در مجموع در 6.5 ساعت شبانه‌روز (بعد از ساعت 17:30 و قبل از ساعت 11:30) پنل کمتر از 50 درصد توان مطلوب را از خورشید دریافت می‌کند، در حالی که در حالت پنل متحرک، تنها در یک ساعت ابتدایی و یک ساعت انتهایی ساعات روشن شبانه‌روز، توان دریافتی کمتر از 50 درصد توان مطلوب است.

با انتگرال‌گیری از هر دو نمودار شکل 12 می‌توان درصد بهبود دریافت انرژی خورشید را در حالت متحرک بودن پنل در مقایسه با حالت ثابت بودن آن محاسبه نمود. برای این انتگرال‌گیری می‌تواند از روش‌های عددی کمک گرفت. محاسبات نشان می‌دهد که دنبال کردن مسیر خورشید، به افزایش 60 درصدی وات‌ساعت دریافتی از خورشید در مجموع ساعات روشن یک روز تابستانی منجر می‌شود.

3-2- تحلیل توان مصرفی در مقایسه با توان دریافتی

برای ارزیابی دقیق توان دریافتی، متصفانه است که توان مصرفی مدار کنترلی

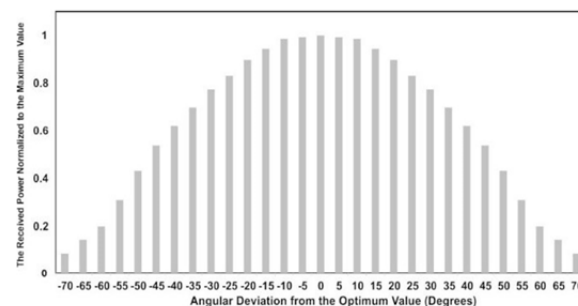


Fig. 11 The received power normalized to the maximum value based on the angular difference between the indicator and sunlight direction.

شکل 11 نسبت توان دریافتی به بیشینه توان قابل دریافت پنل بر حسب اختلاف زاویه بین شاخص و راستای تابش خورشید.

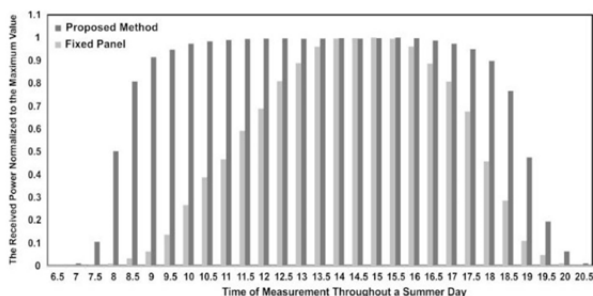


Fig. 12 The received power normalized to the maximum value based on time of measurement during a summer day.

شکل 12 نسبت توان دریافتی به بیشینه توان قابل دریافت پنل بر حسب ساعت اندازه‌گیری در یک روز تابستانی.

مکرر پل است که ممکن است در اثر نویز یا سایر تابش‌های ناگهانی در اطراف پل وجود آید؛ به گونه‌ای که مجموع توان مصرفی به حدود 0.13 درصد توان دریافتی می‌رسد. جدول 2 نتایج ارزیابی پس از ساخت دستگاه را در مقایسه با سایر کارهای مشابه جمع‌بندی می‌کند. مشاهده می‌شود که درصد بهبود توان ذخیره‌شده به 60.3 درصد می‌رسد که در مقایسه با سایر نمونه‌ها، رشد چشمگیری دارد.

5- تقدیر و تشکر

از معاونت محترم فرهنگی-دانشجویی دانشگاه صنعتی ارومیه، آقای دکتر صابر عزیزی، و همچنین مدیریت محترم امور فرهنگی، آقای دکتر مرتضی علی‌اصغری، بعثت تلاش‌های مکرر در راستای تخصیص بودجه پژوهشی به انجمن علمی نجوم دانشجویی با هدف ساخت این دستگاه، تقدیر و تشکر می‌گردد.

6- مراجع

- [1] Sh. Hamrahi, K. Goudarzi, M. Yaghoubi, M. Ghaedi, Experimental Study on the Performance of a Solar Adsorption Chiller with Working Pair of Activated Carbon/Methanol, *Madares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 118-124, 2017. (in Persian)
- [2] B. Koyuncu, K. Balasubramanian, A microprocessor controlled automatic sun tracker, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 37, No. 4, pp. 913-917, Nov. 1991.
- [3] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, A. Sharifi, A review of principle and sun tracking methods for maximizing solar systems output, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 8, pp. 1800-1818, 2009.
- [4] A. Konar, A. K. Mandal, Microprocessor based automatic sun tracker, *IEE Science, Measurement and Technology*, Vol. 138, No. 4, pp. 237-241, 1991.
- [5] P. Baltas, M. Tortoreli, P. E. Russell, Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaic arrays, *Elsevier Solar Energy*, Vol. 37, No. 2, pp. 147-163, 1986.
- [6] Y. J. Huang, et.al, The design and implementation of a solar tracking generating power system, *Engineering Letters*, Vol. 17, No. 4, 2009.
- [7] G. Deb, A. B. Roy, Use of Solar Tracking System for Extracting Solar Energy, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 4, No.1, pp. 42-46, February 2012.
- [8] R. Banerjee, Solar tracking system, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 5, Issue 3, pp. 1-7, March 2015.
- [9] C. Sungur, Sun-Tracking system with PLC control for Photo-Voltaic panels, *International Journal of Green Energy*, Taylor and Francis, Vol. 4, No. 6, pp. 635-643, 2007.
- [10] H. Fathabadi, Novel online sensorless Dual-Axis sun tracker, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 22, No.1, pp. 1-8, 2017.
- [11] H. Fathabadi, Comparative study between two novel sensorless and sensor based Dual-Axis solar trackers, *Solar Energy*, Vol. 138, pp. 67-76, 2016.
- [12] H. Fathabadi, Novel high efficient offline sensorless Dual-Axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators, *Renewable Energy*, Vol. 95, pp. 485-494, 2016.
- [13] C. Cengur, Multi-axes Sun-Tracker system with PLC control for photovoltaic panels in turkey, *Renewable Energy*, Elsevier, Vol. 34, No. 4, pp. 1119-1125, April 2009.
- [14] S. B. Joshi, A. R. Jani, Certain analysis of a solar cooker with dual axis sun tracker, *Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE)*, IEEE, Ahmedabad, India, pp. 1-4, 2013.
- [15] H. Wang, Z. Li, J. Luo, Sh. Xie, H. Li, Design and implementation of a dual-axis sun-tracking system based on microcontroller, *International Conference on Information Technology and Applications*, IEEE, Chengdu, China, pp. 384-387, 2013.
- [16] A. K. Suria, R. M. Idris, Dual-Axis solar tracker based on predictive control algorithms, *IEEE Conference on Energy Conversion*, Johor Bahru, Malaysia, pp. 238-243, 2015.
- [17] S. B. Elagib, N. H. Osman, Design and implementation of Dual Axis solar tracker based on solar maps, *International Conference on Computing, Electrical and Electronic Engineering (ICCEEE)*, IEEE, Khartoum, Sudan, pp. 697-699, 2015.
- [18] W. Liu, Sun Tracker: Design, build and test, *81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, Glasgow, UK, 2015.
- [19] Y. Khilifi, New maximum power point algorithm for photovoltaic systems, *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, Marrakech, Morocco, pp. 2393-2399, 2016.
- [20] I. Stamatescu, I. Făgărășanu, G. Stamatescu, N. Arghiraa, S. S. Iliescu, Design and implementation of a Solar-Tracking algorithm, *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, Elsevier Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 500-507, 2014.

جدول 1 مشخصات کلی طرح

Table 1 Design specifications

پارامتر	واحد	مقدار
ارتفاع پایه	cm	75
ابعاد کفی نگهدارنده	cm×cm	25×50
توان نامی پل	Watt	40
ولتاژ تغذیه مدار کنترلی	Volts	5
ولتاژ تغذیه موتورها	Volts	12
جریان مصرفی متوسط بخش کنترلی	μA	750
جریان مصرفی متوسط جک‌پیستونی	μA	778
حداکثر پل قابل نصب روی پایه	Watt	1200
درصد جریان مصرفی بخش کنترلی به جریان دریافتی پل 40 وات	%	0.0625
درصد جریان مصرفی جک‌های پیستونی به جریان دریافتی پل 40 وات	%	0.065
درصد جریان مصرفی کل به جریان دریافتی پل 40 وات	%	0.13

جدول 2 مقایسه به کارهای مشابه

Table 2 Comparison Table

شماره مرجع و سال انتشار	مکانیزم تعقیب	نیروی محرک	مکانیزم	درصد بهبود نسبت به پل ثابت
[10], 2017	دو محوره	موتور پله‌ای	MPPT Sensorless	28.8-43.6%
[11], 2016	دو محوره	موتور پله‌ای	میکروکنترلر MCU Sensor-based	27.7-42.7%
[13], 2009	دو محوره	موتور DC	کنترلر PLC Sensor-based	42.6%
[24], 2005	تک محوره	موتور DC	مقایسه کننده Sensor-based	30%
این مقاله	دو محوره	جک پیستونی	میکروکنترلر AVR Sensor-based	60.3%

متوسط آمپر ساعت مصرفی جک پیستونی داریم:

$$(8) \quad \frac{\text{زمان هر بار چرخش}}{\text{یک ساعت}} \times \frac{\text{چرخش موتور}}{\text{در یک ساعت}} \times \frac{\text{جریان مصرفی هر جک پیستونی}}{\text{آمپر مصرفی متوسط جک پیستونی}}$$

بر اساس رابطه (8)، بطور متوسط 778 میکروآمپر توسط جک پیستونی مصرف می‌شود که در مقابل دریافت جریان 1.2 آمپری از پل به معنای مصرف 0.065 درصدی توان ذخیره شده در باتری است.

4- نتیجه گیری

در این مقاله دنبال کننده خورشیدی دوجوره بر اساس آشکارسازهای جدید مکانیکی و الکترونیکی پیشنهاد شده است که توانایی رهگیری مسیر تابش خورشید در تمام فصول سال را دارد. دنبال کردن تغییرات جزئی زاویه تابش خورشید به زمین در فصل زمستان، بعثت کوتاه بودن طول روز و کاهش زمان دسترسی به خورشید، تأثیر بسزایی در بهبود میزان وات ساعت دریافتی دارد. دستاورد اصلی آشکارسازهای پیشنهادی، جلوگیری از چرخش‌های ناگهانی و

- [24] K. Karimov, M. Saqib, P. Akhter, M. Ahmed, J. Chatthad, S. Yousafzai, A simple photo-voltaic tracking system. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 87, pp. 49–59, 2005.
- [25] A. Georgiev, P. Roth, A. Olivares, Sun following system adjustment at the UTFSM. *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1795–1806, 2004.
- [26] W. Bolton, *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical Engineering*, pp. 7-85, New York: Longman Pub Group, 1998.
- [27] P. R. Gray, P. J. Hurst, S. H. Lewis, R. G. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, pp. 169-185, New York: John Wiley & Sons, Fifth Edition, 2009.
- [21] Y. Rizal, S. H. Wibowoa, M. Feryadi, Application of solar position algorithm for sun-tracking system, *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*, Elsevier Energy Procedia, Vol. 32, pp. 160–165, 2013.
- [22] Q. X. Zhang, H. Y. Yu, Q. Y. Zhang, Z. Y. Zhang, C. H. Shao, D. Yang, A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses, *Energies*, Vol. 8, pp. 7367-7380, 2015.
- [23] P. Sharma, N. Malhotri, Solar tracking system using microcontroller, *Proceedings of 2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE)*, IEEE, Kalyani, India, pp. 77-79, 2014.