



طراحی و ارزیابی دنبال کننده خورشیدی دو محوره ترکیبی

مهرداد عارف پور¹، کاظم جعفری نعیمی^{2*}، حمید مرتضی پور²، مصطفی جعفری کرمانی پور³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

2- استادیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

3- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای شهید چمران، تهران

*کرم، صندوق پستی 76169133، jafarinaeimi@uk.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، به منظور افزایش دریافت انرژی خورشیدی در صفحه‌های فتوولتائیک، یک دنبال کننده خورشیدی ترکیبی دو محوره ساخته و مورد ارزیابی قرار داده شد. حرکت صفحه فتوولتائیک در این دنبال کننده به دو روش فعال و غیر فعال می‌باشد، که به ترتیب با استفاده از الکتروموتور و گاز مایع به عنوان سیال عامل، کار می‌کند. الکتروموتور مطابق اصل تاریخ زمانی، حرکت خورشید را در جهت شرقی- غربی با استفاده از یک میکرو کنترلر برنامه ریزی شده از ابتدا تا انتهای روز دنبال می‌نماید و برای حرکت در جهت شمالی- جنوبی، از قانون گاز کامل و تغییر فشار گاز با افزایش دمای آن استفاده می‌کند. اجزای دنبال کننده برای حرکت در این جهت شامل دو مخزن حاوی گاز مایع پالایشگاهی (LPG) نصب شده در کناره‌های صفحه فتوولتائیک و یک سیلندر نیوماتیکی بودند. نتایج تحقیق نشان داد، به کارگیری دنبال کننده به صورت تک محوره شمالی- جنوبی، تک محوره شرقی- غربی و دو محوره به ترتیب باعث افزایش 5.03، 33.75 و 38.78 درصدی در انرژی تابش دریافتی از خورشید و بهبود 4.82، 31.43 و 36.25 درصدی در تولید انرژی الکتریکی روزانه صفحه فتوولتائیک نسبت به حالت ثابت می‌شود. در مجموع استفاده از دنبال کننده، منجر به افزایش دمای کاری صفحه فتوولتائیک شد. براساس دمای کاری صفحه خورشیدی در حالت مجهز به دنبال کننده، می‌توان آن را برای سامانه‌های فتوولتائیک- گرمایی توصیه کرد. سامانه مورد ارزیابی توانست خورشید را در راستای محور شرقی- غربی، با اختلاف 0.6 درصد و در راستای شمالی- جنوبی، با اختلاف 8 درصد دنبال کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 دی 1396

پذیرش: 15 اسفند 1396

ارائه در سایت: 23 فروردین 1397

کلید واژگان:

دنبال کننده خورشیدی

صفحه فتوولتائیک

دریافت انرژی

تولید الکتریسیته

Design and field evaluation of a novel combined double-axis solar tracker

Mehrdad Arefpour¹, Kazem Jafarinaeimi^{1*}, Hamid Morteza pour¹, Mostafa Jafari Kermanipour²

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar university of Kerman, Kerman, Iran

2- Department of Electrical engineering, Technical and Vocational university of Shahid Chamran, Tehran, Iran

*P.O.B. 76169133, Kerman, Iran, jafarinaeimi@uk.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 December 2017

Accepted 06 March 2018

Available Online 12 April 2018

Keywords:

Solar tracker

Photovoltaic module

Energy gain

Electricity generation

ABSTRACT

To improve solar energy gain by the photovoltaic (PV) modules, a novel double-axis solar tracker was developed in the present study. The proposed system worked based on both active and passive methods of sun tracking using electromotor and gas actuator, respectively. The electromotor oriented the module in the east-west direction based on the principle of the chronology of the sun, and in the north-south direction, the change in the gas pressure, due to the temperature change, activated a pneumatic cylinder to rotate the module. The evaluation tests were carried out at the different modes of tracking (including east-west, north-south and double axis). The results showed that the available solar energy on the PV module increased by 5.03%, 33.75% and 38.78% using the tracker at the north-south, east-west and double axis modes, respectively. This, finally, improved electricity generation of the PV module by 4.82%, 31.43% and 36.25%, respectively. Moreover, employing the tracker system led to an increase in operating temperature of the PV module. Based on the operating temperature of the module with the tracking system, it was proposed for using in the photovoltaic-thermal collectors. The designed system could track the sun trajectory with the accuracies of 0.6% and 8% in the east-west and south-north directions, respectively.

1- مقدمه

مخرب بر محیط زیست و بدون تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشد [2]. برای تبدیل انرژی نورانی خورشید به الکتریکی از صفحه‌های (ماژول‌های) فتوولتائیک استفاده می‌شود. به‌طور کلی توان تولیدی صفحه‌های فتوولتائیک علاوه بر کیفیت و اندازه آن، تحت تأثیر شدت تابش خورشید و دمای محیط می‌باشد. با این حال، هزینه زیاد تولید الکتریسیته از طریق صفحه‌های فتوولتائیک، هنوز یک چالش بزرگ در استفاده از این فناوری می‌باشد [3]. از نظر تجربی و ریاضی به کارگیری دنبال کننده‌های خورشیدی می‌تواند

امروزه انرژی الکتریکی مهم‌ترین شکل انرژی است که در جهان استفاده می‌شود. به دلیل افزایش جمعیت و گسترش صنایع، تقاضا برای این نوع انرژی به‌طور مداوم با نرخ 3 درصد در طول سال در حال افزایش است. حدود 67 درصد تولید انرژی الکتریکی ناخالص جهان توسط نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت فسیلی است، که باعث افزایش آلودگی محیط زیست می‌شود [1]. انرژی خورشیدی، پاک، تمیز، قابل اعتماد، کم هزینه، دارای کم‌ترین اثر

$$\text{Time}_S - \text{Time} = \pm 4 (L_S - L) + E \quad (1)$$

که در آن Time_S زمان خورشیدی و Time بیانگر زمان محلی، L_S و L به ترتیب، فاصله زاویه‌ای نسبت به گرینویچ و طول جغرافیایی منطقه و E معادله زمان است از رابط (2) به دست می‌آید.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (2)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3)$$

اگر زاویه بین زمین و خورشید را در ظهر خورشیدی صفر درجه در نظر گرفته شود، اختلاف زاویه ایجاد شده با ساعت‌های مختلف نسبت به این زمان را زاویه ساعتی خورشیدی گویند. این زاویه با استفاده از رابط (4) محاسبه می‌شود:

$$\omega = \pm \frac{360^\circ}{24} \times t \quad (4)$$

که در آن ω زاویه ساعتی خورشید بر حسب درجه و t تعداد ساعت‌های قبل یا بعد از ظهر خورشیدی است. علامت منها مربوط به زمان قبل از ظهر خورشیدی است.

به زاویه بین اشعه نور خورشید با صفحه استوا، زاویه میل خورشیدی می‌گویند. محاسبه این زاویه از طریق روابط هندسی مهم‌ترین گام در رابطه‌های حاکم بر موقعیت زمین و خورشید به حساب می‌آید. زاویه میل را با δ نشان می‌دهند و به وسیله رابطه‌ی (5) قابل محاسبه می‌باشد [14].

$$\delta = 23.47^\circ \times \sin \frac{360 \times (248 + n)}{365} \quad (5)$$

خورشیدی برای روزهای آغازین فصل بهار و فصل پاییز یعنی اول فروردین و اول مهر دقیقاً از شرق طلوع کرده و در غرب غروب می‌کند. از ابتدای فروردین تا اول تیر، زاویه میل خورشیدی افزایش پیدا می‌کند و سپس تا اول دی، به کمترین مقدار خود می‌رسد. این زاویه در طول سال به موجب حرکت انتقالی زمین از 23.45 تا 23.45 تغییر می‌کند.

صفحه فتوولتائیک همواره باید عمود بر جهت تابش خورشید بوده تا به بیشینه‌ی تولید برسد. به این منظور، از دنبال کننده‌های خورشیدی استفاده می‌شود تا آن‌ها را در هر زمان به سمت نور مستقیم خورشید قرار دهد. با استفاده از زاویه میل و زاویه ساعتی خورشید می‌توان موقعیت خورشید را نسبت به مرکز زمین محاسبه کرد. برای مشخص کردن وضعیت دقیق خورشید نسبت به سطح زمین در طول روز و برای همه روزهای سال لازم است موقعیت خورشید را با استفاده از دو زاویه تعیین کرد که عبارت‌اند از زاویه اوج²، مربوط به حرکت ارتفاعی وضعیت خورشید و زاویه راستای خورشیدی³ مربوط به حرکت شرقی-غربی نسبت به زمین می‌باشد [16، 17].

زاویه اوج (θ_z) از رابطه‌ی (6) محاسبه می‌شود [18].

$$\cos \theta_z = (\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega) + (\sin \phi \times \sin \delta) \quad (6)$$

که در این رابطه: ϕ عرض جغرافیایی⁴ بر حسب درجه می‌باشد. زاویه اوج همواره بین صفر و 90 درجه، است. در رابطه (6) زاویه راستای خورشیدی (γ_s) در هر روز و ساعت قابل محاسبه است.

$$\gamma_s = \text{sign } \omega \times \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \times \sin \phi - \sin \delta_s}{\sin \theta_z \times \cos \phi} \right) \right| \quad (7)$$

تا 60 درصد افزایش تولید داشته باشد [4-6]. دنبال کننده‌های خورشیدی براساس تعداد محور به دو نوع تک محوره و دو محوره، و براساس نحوه‌ی تحریک، به سامانه‌های فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شوند. در سامانه‌ی غیرفعال، دنبال کننده‌ها پیچیدگی و دقت کمتری دارند. در سال 1969 زومورک اولین دنبال کننده‌ی خورشیدی غیرفعال را طراحی کرد. در این دنبال کننده، از یک سیال فرار به عنوان محرک استفاده شد [7]. در طرحی دیگر از دنبال کننده‌های غیرفعال، از آلیاژ آلومینیوم/ فولاد استفاده شد که در اثر تابش نور خورشید، موجب حرکت صفحه فتوولتائیک در طول روز می‌شد و با یک میراگر ویسکوز¹ کنترل می‌شد [8]. در سال 2015 پارمار و همکاران به منظور دنبال کردن خورشید از شرق به غرب، با استفاده از گرمای تابش مستقیم نور خورشید، سیالی را از یک سمت صفحه فتوولتائیک به سمت دیگر انتقال دادند. در این دنبال کننده، هیچ گونه موتور، جعبه دنده یا سامانه‌ی کنترلی به کار برده نشده بود. نتایج نشان داد که با استفاده از این سامانه، تولید الکتریسته 25 درصد نسبت به صفحه‌های ثابت فتوولتائیک بیشتر شد [9]. نوع دیگری از دنبال کننده‌های دو محوره خورشیدی توسط ری و همکاران ارائه گردید که در آن از میکروکنترلر براساس اصل تاریخ زمانی استفاده شد. نتایج نشان داد استفاده از این دنبال کننده 37 درصد نسبت به صفحه‌های ثابت خورشیدی افزایش تولید داشت [10]. یک دنبال کننده‌ی دو محوره توسط وانگ و لو ارائه شد که در آن از یک حسگر نوری چهار وجهی مبتنی بر سامانه‌های فتوولتائیک استفاده شد. نتایج نشان داد که این سامانه در روزهای آفتابی و تا حدی آفتابی 28.31 درصد بهبود تولید دارد [11]. یک سامانه‌ی دنبال کننده‌ی دو محوره خورشیدی براساس اصل تاریخ و زمان و ترکیب شده با حسگر نوری، توسط آدرین و همکاران پیشنهاد شد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه‌ی مورد ارزیابی در روزهای آفتابی 58.59 تا 59.24 درصد افزایش تولید داشت [12].

در مجموع، از بررسی پژوهش‌های انجام شده در خصوص سامانه‌های دنبال کننده‌ی خورشید، می‌توان چنین استنباط کرد که انواع فعال در مقایسه با انواع غیرفعال، دارای پیچیدگی و دقت بالاتری هستند. اما، انواع غیرفعال به دلیل سادگی و عدم نیاز به منبع توان خارجی (علاوه بر نور خورشید) دارای برتری می‌باشند [13]. در تحقیق حاضر، به منظور استفاده از مزایای هر دو نوع دنبال کننده، یک سامانه دنبال کننده دو محوره خورشیدی با ترکیبی از نوع فعال و غیرفعال ساخته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تاکنون چنین دنبال کننده‌ای با آرایش استفاده شده در طرح حاضر، در ادبیات پیشین گزارش نشده است. همچنین، سعی بر آن شد، در حالت غیرفعال، از گاز مایع پالایشگاهی، که ارزان، فراوان و بی خطر برای محیط زیست می‌باشد، استفاده گردد. در ادامه، هر یک از دنبال کننده‌ها به صورت جداگانه و ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفتند و عملکرد آن‌ها، با یک صفحه فتوولتائیک نصب شده بر روی یک شاسی ثابت مقایسه شد.

2- محاسبه موقعیت خورشید

نور خورشید، به دلیل چرخش زمین، با زاویه‌های مختلف به سطح زمین برخورد می‌کند. زمین هر 24 ساعت یک دور کامل (360 درجه) به دور خود می‌چرخد، بنابراین عبور خورشید به اندازه 15 درجه از طول جغرافیایی، یک ساعت طول می‌کشد. زمانی که در روابط مربوط به زاویه خورشید استفاده می‌شود، زمان خورشیدی بوده و با زمان محلی مطابقت ندارد. رابطه (1) ارتباط بین زمان محلی و خورشیدی را بیان می‌کند [14].

² Zenith angle

³ Solar azimuth angle

⁴ Longitude

¹ Viscous damper

شد تا داده‌های اولیه را دریافت کند. بر این اساس با وارد کردن متغیرها که شامل ساعت، دقیقه، تاریخ، ساعت طلوع و غروب خورشید می‌باشد، مدت زمان خاموش بودن موتور و فاصله زمانی روشن بودن تنظیم می‌شود. با توجه به این که موقعیت خورشید در هر 10 دقیقه 2.5 درجه تغییر می‌کند، زمان خاموش بودن موتور 10 دقیقه تنظیم شد. بر همین اساس، مدار الکترونیکی در هر 10 دقیقه پس از طلوع خورشید، جریان برق را به موتور متصل می‌کند. در مدت زمان اتصال جریان برق، محور دنبال کننده 2.5 درجه چرخش می‌کند. با تنظیم ولتاژی برابر 5 ولت در فاصله زمانی 4 ثانیه موتور الکترونیکی این زاویه را طی می‌نماید. با توجه به زمان غروب خورشید، میکروکنترلر در این ساعت حرکت رو به جلوی موتور را قطع کرده و مدار الکتریکی، جهت جریان را تغییر می‌دهد، با معکوس شدن جریان الکتریکی، جهت حرکت موتور برعکس شده و صفحه فتوولتائیک را به نقطه اولیه باز می‌گرداند. سرانجام با رسیدن موتور به نقطه اولیه در ابتدای مسیر حرکت، جریان قطع می‌شود. "شکل 2" تصویری از آن مدار ساخته شده را نشان می‌دهد. در محور نگه‌دارنده‌ی (شاسی) صفحه فتوولتائیک، از دو بلبرینگ پاتاقانی مدل UCF204 برای ایجاد درجه آزادی در جهت محور شرقی- غربی استفاده شد.

3-3- مشخصات محور دوم

محور دوم با استفاده از گاز مایع (به عنوان سیال عامل) و جک نیوماتیکی، عمل دنبال کردن در راستای محور شمالی- جنوبی انجام می‌گیرد. در دو طرف صفحه فتوولتائیک، در جهت شمالی- جنوبی، دو مخزن حاوی گاز مایع قرار دارد که به وسیله‌ی لوله‌های فشارقوی به یک جک نیوماتیکی (مدل SC-50X300-S) متصل گردیده و در زیر صفحه فتوولتائیک نصب شد. این دو مخزن گاز 6 کیلوگرمی، از جنس فولاد با قابلیت تحمل فشار 25 بار، در دو طرف صفحه فتوولتائیک، به عنوان جاذب‌های نور در سامانه‌ی دنبال کننده غیرفعال، استفاده شد. به هر مخزن مقدار 3 کیلوگرم گاز مایع تزریق شد. گاز مایع به‌طور معمول از دو ترکیب هیدروکربنی پروپان و بوتان تشکیل شده است. بوتان شامل دو ترکیب ایزوبوتان و نرمال بوتان است. این گاز فاقد رنگ، بو، مزه و به‌طور کلی زیان آور نیست. به منظور آگاهی از نشت گاز مایع، ترکیبات گوگردار به آن اضافه می‌شود. این سیال در شرایط فشار و دمای عادی به‌صورت گاز است و تحت فشار 8 تا 10 بار، اجزاء آن به مایع تبدیل می‌شود. [19]. جک دو طرفه نیوماتیکی، زاویه نگه‌دارنده‌ی صفحه فتوولتائیک

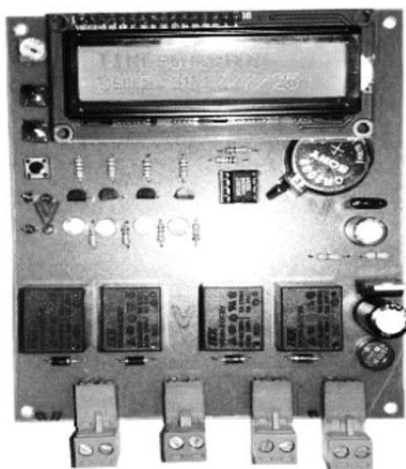


Fig. 2 A photograph of the controller board

شکل 2 تصویر مدار کنترلر موتور الکتریکی

زاویه راستای خورشید می‌تواند در محدوده 180 تا 180- درجه تغییر کند. در روزهای کمتر از 12 ساعت، برای عرض‌های جغرافیایی شمال یا جنوب بین 23.45 و 66.45 درجه، γ_s بین 90 و 90- درجه خواهد بود. برای روزهای با طول بیش از 12 ساعت بین طلوع و غروب خورشید، در اوایل و اواخر روز هنگامی که خورشید در شمال خط شرقی- غربی، در نیم کره شمالی، یا جنوب خط شرقی- غربی در نیم کره جنوبی است، γ_s بزرگ‌تر از 90 یا کمتر از 90- درجه است. تابع Sing در رابطه (7) در صورت مثبت بودن ω معادل 1+ و در صورت منفی بودن معادل 1- می‌باشد [18].

3- مواد و روش‌ها

3-1- ساخت سامانه

تصویری از دنبال کننده‌ی ساخته شده در تحقیق حاضر و اجزای آن، در "شکل 1" آورده شده است. در سامانه‌ی موردنظر، محور شرقی- غربی که براساس زاویه راستای خورشید حرکت می‌کند، توان را از یک موتور خطی الکتریکی و یک جعبه دنده می‌گرفت و عمل دنبال کردن را با استفاده از اصل تاریخ- زمانی حرکت خورشید انجام می‌داد. در دنبال کننده‌ها، محور شرقی- غربی به عنوان محور اول و محور شمالی- جنوبی به عنوان محور دوم نامیده می‌شود.

3-2- مشخصات محور اول

محور اول به‌صورت عمودی با یک درجه آزادی انتخاب شد و مجموعه صفحه خورشیدی، جک نیوماتیکی و مخزن‌ها بر روی آن نصب گردیدند. در پایین این محور، یک جعبه دنده برای سهولت در به‌کارگیری موتور الکتریکی مدل LA31 ساخت کشور تایوان به‌کار گرفته شد. به‌منظور چرخش منظم محور در راستای شرق- غرب، با توجه به تغییرات زاویه خورشید در این راستا، از یک مدار کنترل الکترونیکی استفاده شد. این مدار با یک میکروکنترلر ای تی مگا 8 به وسیله برنامه اسمبلی بیسیک برنامه‌ریزی شد. بر روی مدار سه کلید تعبیه

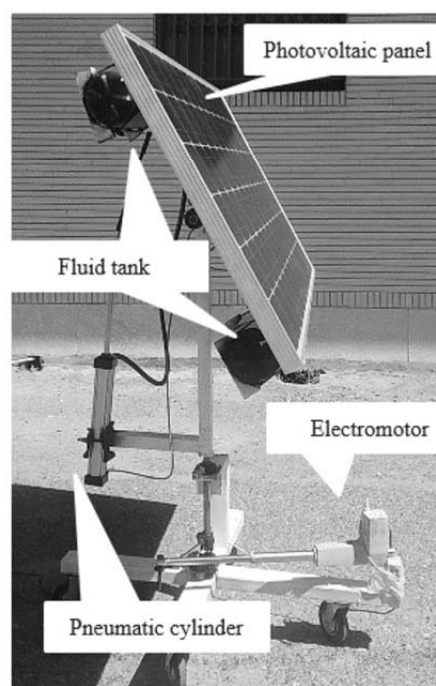


Fig. 1 The designed solar tracking system

شکل 1 سامانه دنبال کننده خورشیدی ساخته شده



Fig. 4 A photograph of the PV modules mounted on the solar tracker and fixed frames during the tests

شکل 4 تصویری از صفحه‌های فتوولتائیک نصب شده بر روی سازه‌های متحرک و ثابت در هنگام آزمایش

جدول 1 مشخصات صفحه فتوولتائیک استفاده شده در تحقیق

مشخصات	مقدار
توان بیشینه (وات)	180
جریان بیشینه (آمپر)	5.06
ولتاژ بیشینه (ولت)	35.6
جریان اتصال کوتاه (آمپر)	5.8
ولتاژ مدار باز (ولتاژ)	43.2
ابعاد (میلی‌متر)	1508 × 808 × 45
وزن (کیلوگرم)	15.5

برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف (شامل سطح صفحه فتوولتائیک در سه نقطه و محیط) از حسگرهای دما استفاده گردید، این حسگرها به یک ترانسیمتر دما متصل شدند. برای اندازه‌گیری دمای سطح صفحه‌های خورشیدی حسگرها در زیر صفحه خورشیدی نصب گردیدند. اندازه‌گیری فشار درون مخزن‌ها، به‌صورت جداگانه، به وسیله فشارسنج متصل شده به هر مخزن اندازه‌گیری شد. به منظور اندازه‌گیری شدت جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و توان بیشینه از یک دستگاه سولار آنالایزر² استفاده گردید. برای اندازه‌گیری زاویه چرخش صفحه فتوولتائیک در راستای محور شرقی- غربی از یک صفحه مدرج نصب شده روی پایه نگهدارنده محور عمودی استفاده شد. این صفحه مدرج هم مرکز با محور عمودی بود. بر روی محور عمودی یک نشانگر نصب شد که زاویه محور دنبال کننده را نشان می‌داد. برای اندازه‌گیری زاویه صفحه فتوولتائیک در جهت شمالی- جنوبی از یک زاویه سنج استفاده شد. با قرار دادن زاویه سنج بر روی صفحه فتوولتائیک، نشانگر آن، زاویه اوج صفحه را فتوولتائیک نشان می‌دهد. "شکل 5" زاویه سنج و صفحه مدرج استفاده شده، برای اندازه‌گیری زاویه‌های صفحه فتوولتائیک نشان می‌دهد. در پیوست 1 مشخصات ابزار اندازه‌گیری آورده شده است. توان سلول فتوولتائیک با استفاده از رابطه (8) محاسبه می‌شود.

$$P_{pv} = V_{max} \times I_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (8)$$

را در طول روز تغییر می‌دهد و همچنین باعث پایداری صفحه در اثر عامل‌های خارجی، مانند جریان باد می‌شود. تحرک جک از طریق اختلاف فشار گاز ایجاد شده داخل مخزن‌ها، به‌وسیله حرارت خورشید انجام می‌گیرد. به‌منظور افزایش جذب نور خورشید، سطح بیرونی مخزن‌ها با رنگ مشکی، به‌طور کامل پوشانده شد. مخزن‌ها به نحوی در کناره‌های صفحه‌ی فتوولتائیک قرار گرفتند، تا زمانی که صفحه عمود بر راستای اشعه‌ی خورشید است، شدت تابش بر سطح هر دو مخزن یکسان باشد. بنابراین، در صورت چرخش خورشید، شدت تابش به یک مخزن نسبت به دیگری تغییر کرده و در نتیجه دما و فشار گاز درون آن، افزایش می‌یابد. این امر باعث، ایجاد اختلاف فشار در دو سمت جک دوطرفه می‌شود، در نتیجه‌ی آن، جک به نحوی حرکت می‌کند تا دوباره صفحه‌ی خورشیدی را عمود بر راستای تابش (برابر شدن فشار در مخزن‌ها) قرار دهد. "شکل 3" طرح‌واره حرکت صفحه خورشیدی در راستای شمالی- جنوبی، و نحوه کار دنبال کننده غیرفعال در طول روز را نشان می‌دهد.

4-روش انجام آزمایش

سامانه دنبال کننده خورشیدی ساخته شده، در شهریور ماه 96 مورد ارزیابی قرار گرفت. این سامانه در حالت‌های دو محوره، تک محوره شرقی- غربی، تک محوره شمالی- جنوبی و در سه تکرار (هر تکرار در یک روز از ساعت 8 صبح تا 6 بعدازظهر) مورد آزمایش ارزیابی قرار گرفت. برای مقایسه عملکرد سامانه دنبال کننده با نوع ثابت، یک صفحه فتوولتائیک به‌صورت ثابت در کنار سامانه نصب شد (شکل 4). صفحه خورشیدی به‌کار برده شده در آزمایش‌ها مدل ES-11-12-180، نوع مونوکریستال بود. جدول 1 مشخصات صفحه فتوولتائیک استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش شامل شدت تابش خورشید بر سطح صفحه فتوولتائیک، دما، ولتاژ مدار باز، شدت جریان اتصال کوتاه، زاویه صفحه فتوولتائیک و توان بیشینه بودند. تابش دریافتی با استفاده از دستگاه تابش‌سنج¹ اندازه‌گیری شد. تابش اندازه‌گیری شده از نوع تابش کل می‌باشد.

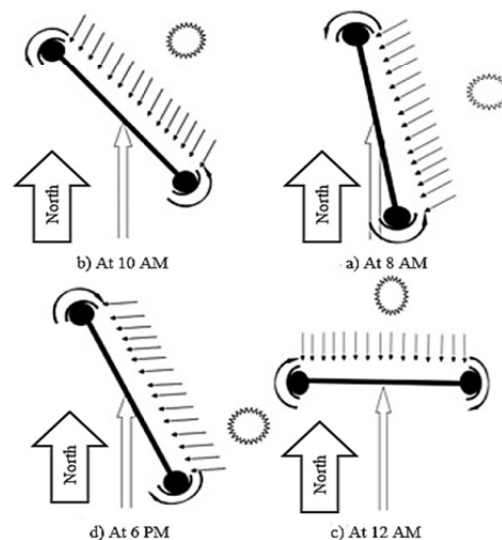


Fig. 3 Working principle of the solar tracker in north-south direction

شکل 3 نحوه کار دنبال کننده خورشیدی در جهت شمالی- جنوبی

² Solar analyzer Model PROVA 200

¹ Solar meter

بیشینه آن محاسبه شد. از آن جا که این متغیرها، به طور مستقیم اندازه گیری شدند، عدم قطعیت توان الکتریکی به صورت رابطه (12) زیر محاسبه شد [21]:

$$U_{el} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{pv}}{\partial I_{max}}\right)^2 U_{I_{max}}^2 + \left(\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{max}}\right)^2 U_{V_{max}}^2} \quad (12)$$

جدول 2 نتیجه تحلیل عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مورد ارزیابی در تحقیق را نشان می دهد.

5- نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارزیابی دنبال کننده خورشیدی دو محوره ترکیبی ساخته شده در پژوهش در ادامه آورده شده است. "شکل 6" شدت تابش خورشید بر روی صفحه فتوولتائیک در حالت های ثابت، متحرک دو محوره، تک محوره شرقی- غربی و تک محوره شمالی- جنوبی را نشان می دهد. با توجه به شکل، کمترین میانگین شدت تابش خورشید برای صفحه ای ثابت می باشد که در فاصله زمانی بین ساعت های 8 صبح تا 6 عصر در محدوده 125 تا 887 وات بر متر مربع به دست آمده است. بیشترین مقدار آن روی صفحه فتوولتائیک متحرک دو محوره حاصل شد که در محدوده 624 تا 900 وات بر متر مربع متغیر بود. در ساعت های ابتدایی و انتهایی روز، اختلاف بیشتری در دریافت شدت تابش بین صفحه های متحرک با صفحه خورشیدی ثابت وجود دارد. با این وجود در ساعت های میانی روز، به دلیل برابر شدن زاویه صفحه فتوولتائیک متحرک و ثابت، مقدار تابش خورشید بر روی آن ها، اختلاف اندکی نشان می دهد. در مجموع، شدت تابش خورشیدی دریافتی در صفحه های متحرک با محور شرقی- غربی و دو محوره، به ترتیب 33.75 و 38.78 درصد بیشتر از حالت ثابت می باشد. با توجه به "شکل 6" شدت تابش دریافتی صفحه فتوولتائیک در حالت تک محوره شمالی- جنوبی کمتر از حالت ثابت می باشد. در ابتدای روز، تابش دریافتی مخزن ها، به دلیل عرض کم صفحه در مقایسه با طول مخزن، برابر است. در نتیجه زاویه صفحه فتوولتائیک تغییرات بسیار کمی دارد. در ساعت 9:30 صبح، با کاهش زاویه راستای خورشید و دریافت تابش های متفاوت بر سطح مخزن ها، زاویه صفحه فتوولتائیک تغییر کرده و این امر موجب آن شد که تابش بر سطح صفحه فتوولتائیک، رفته رفته، افزایش پیدا کند. در حالت دو محوره، به دلیل قرارگیری صفحه فتوولتائیک به سمت شرق در ابتدای صبح، نور خورشید از کناره های صفحه، به طور مساوی، به مخزن ها نمی تابد. لذا، با بالا آمدن خورشید، تابش دو مخزن متفاوت می شود و صفحه فتوولتائیک از ابتدای صبح در جهت شمالی- جنوبی نیز حرکت می کند. از این رو، نتایج نشان می دهد که سهم افزایش دریافت انرژی دنبال کننده دو محوره، به وسیله محور شمالی- جنوبی با استفاده از سیال فرار، برابر 5.03 درصد است.

نتایج آزمایش های عبدالله و همکاران روی یک سامانه دنبال کننده دو محوره نشان داد، شدت تابش خورشید روی صفحه فتوولتائیک به طور

جدول 2 عدم قطعیت پارامترهای اندازه گیری اندازه گیری شده

پارامتر	واحد	میانگین	عدم قطعیت
دمای سطح صفحه فتوولتائیک متحرک	(°C)	46.7	±1.45
دمای سطح صفحه فتوولتائیک ثابت	(°C)	35.8	±1.12
دمای محیط	(°C)	27	±0.44
شدت تابش خورشید	(W/m ²)	540	±10
توان صفحه فتوولتائیک	(W)	180	±2.02
زاویه صفحه	(°)	180	±1.2

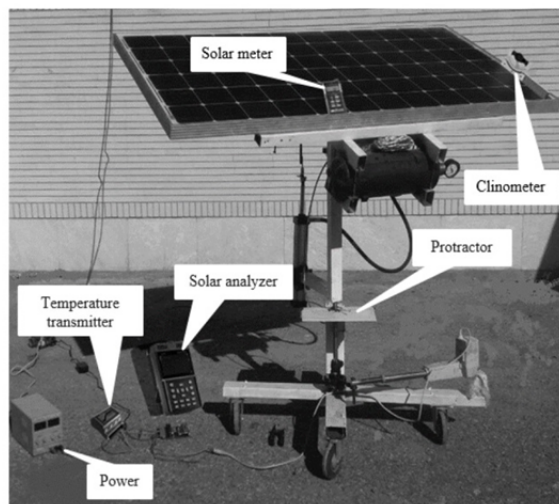


Fig. 5 Protractors, Clinometer, Solar analyzer, Solar meter, Temperature transmitter and Power used for measurement of solar tracker during test

شکل 5 زاویه سنج، شیب سنج، سولار آنالایزر، تابش سنج، ترانس میتر دما و منبع تغذیه مدار و موتور الکتریکی استفاده شده در طول آزمایش دنبال کننده

که در آن P_{pv} توان صفحه فتوولتائیک بر حسب وات، V_{max} ولتاژ بیشینه بر حسب ولت، I_{max} شدت جریان بیشینه بر حسب آمپر، V_{oc} ولتاژ مدار باز بر حسب ولت، I_{sc} شدت جریان اتصال کوتاه بر حسب آمپر و FF ضریب پرشدگی صفحه فتوولتائیک می باشد [18].

برای تعیین انرژی الکتریکی تولید شده روزانه هر صفحه فتوولتائیک از رابطه (9) استفاده شد.

$$E_g = \int P_{pv} dt - \int P_m dt \quad (9)$$

که در آن E_g انرژی خالص تولیدی (Wh)، P_m توان مصرفی موتور الکتریکی و dt بازه زمانی ثبت داده ها (h) است.

بازده الکتریکی (η_{el}) بر حسب درصد، مطابق بیشینه توان الکتریکی تولیدی به وسیله صفحه فتوولتائیک تقسیم بر انرژی تشعشعی دریافت شده بر سطح آن، به صورت رابطه (10) تعریف می گردد [14].

$$\eta_{el} = \frac{P_{pv}}{A_c \times I(t)} \times 100 \quad (10)$$

که در آن A_c بیانگر مساحت سطح صفحه فتوولتائیک و $I(t)$ شدت تابش خورشید می باشد.

خطاها و عدم اطمینان در آزمایش ها به طور معمول، به وسیله ابزار اندازه گیری، محیط، مشاهده و خواندن، برنامه ریزی آزمایش و شرایط مرزی اتفاق می افتد. برای تعیین کلی خطاهای موجود در اندازه گیری های آزمایشی، از تحلیل عدم قطعیت استفاده شد. پارامترهای اندازه گیری شده در این تحقیق شامل دما، شدت تابش خورشید روی صفحه فتوولتائیک، زاویه صفحه فتوولتائیک و توان خروجی صفحه فتوولتائیک می باشد. عدم قطعیت هر یک از این پارامترها با استفاده از رابطه (11) به دست آمد [21,20]:

$$U_F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (F_j - \bar{F})^2}{m(m-1)}} \quad (11)$$

که در این رابطه U نشان دهنده عدم قطعیت، F شامل هر یک از پارامترهای اندازه گیری شده، $\bar{F}$ مقدار میانگین آن و m تعداد اندازه گیری ها می باشد. با توجه به رابطه ی (8)، توان الکتریکی صفحه فتوولتائیک بر اساس ولتاژ و آمپراژ

شرقی- غربی و دو محوره به ترتیب نسبت به حالت ثابت 31.43 و 36.25 درصد بالاتر است. با توجه به نتایج، سهم دنبال کننده شمالی- جنوبی در حالت دو محوره 4.82 درصد می باشد. نتایج تحقیقات آدرین و همکاران روی دنبال کننده خورشیدی غیرفعال نشان داد که این دنبال کننده نسبت به حالت ثابت 23 درصد افزایش توان دارد [12]. همچنین در تحقیق دیگری نتایج آزمایش های ری و همکاران روی دنبال کننده خورشیدی با استفاده از میکرو کنترلر و موتور الکتریکی نشان داد صفحه فتوولتائیک در حالت تک محوره شرقی- غربی 37 درصد نسبت به صفحه فتوولتائیک ثابت افزایش توان دارد [10]. در پژوهشی دیگر روی یک سامانه دنبال کننده دو محوره توسط انجین و همکاران، در شرایط آب و هوایی معمولی، انرژی دریافتی نسبت به حالت ثابت 40.7 درصد افزایش داشت [23].

"شکل 8 و 9 و 10" تغییرات دمای سطح صفحه فتوولتائیک ثابت، متحرک دو محوره، متحرک در محور شمالی- جنوبی، متحرک در راستای محور شرقی- غربی و دمای محیط را در طول روزهای آزمایش نشان می دهد. با توجه به شکل، دمای محیط در فاصله زمانی بین ساعت های 8 صبح تا 6 عصر در محدوده 28 تا حدود 34 درجه ی سلسیوس تغییر کرد.

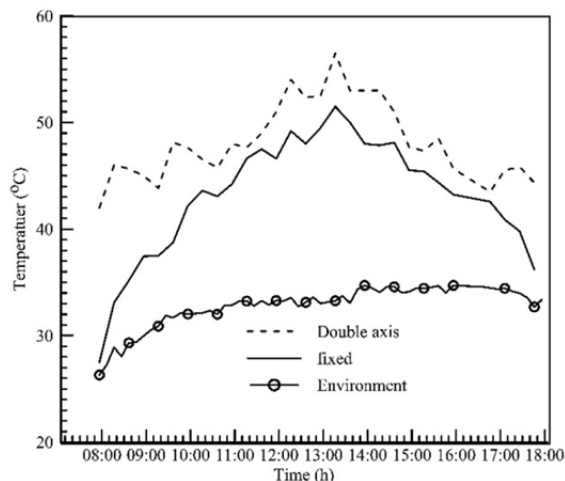


Fig. 8 Module surface temperature at the double-axis mode of tracking
شکل 8 دمای سطح صفحه فتوولتائیک در حالت دنبال کردن دو محوره

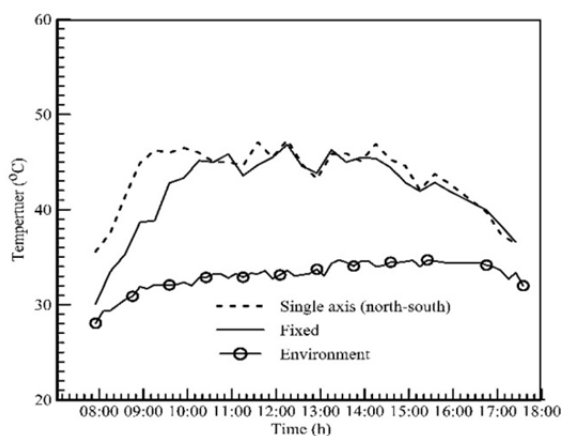


Fig. 9 Module temperature at the north-south single axis mode of tracking

شکل 9 دمای صفحه فتوولتائیک در حالت دنبال کردن تک محوره شمالی- جنوبی

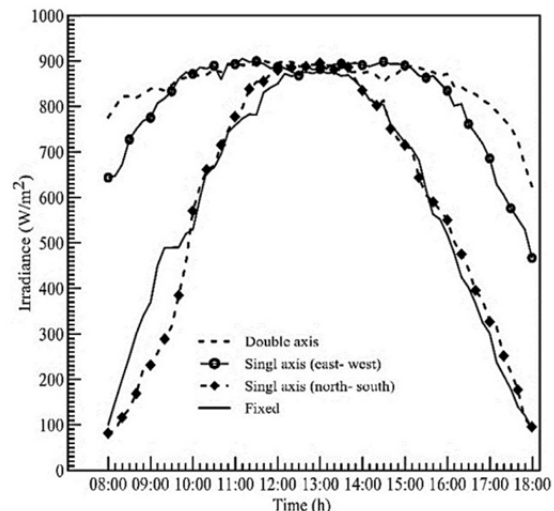


Fig. 6 Solar radiation intensity on the PV modules at the different tracking modes

شکل 6 شدت تابش دریافتی صفحه فتوولتائیک در حالت های متفاوت روز

میانگین، در محور شمالی- جنوبی 7.19 درصد، محور شرقی- غربی 24.5 درصد و در حالت دو محوره 34.8 درصد نسبت به حالت ثابت افزایش یافت [22].

"شکل 7" توان بیشینه تولیدی به وسیله صفحه فتوولتائیک ثابت، با دنبال کننده دو محوره، تک محوره شرقی- غربی و تک محوره شمالی- جنوبی را در طول روز نشان می دهد. با توجه به شکل، توان بیشینه خروجی از صفحه فتوولتائیک ثابت در فاصله زمانی بین ساعت های 8 صبح تا 6 عصر، در محدوده 5.89 تا 135.9 وات تغییر می کند. توان بیشینه در حالت تک محوره شمالی- جنوبی در ابتدای روز، مقدار کمتری از حالت ثابت دارد، در نتیجه به کارگیری دنبال کننده تک محوره شمالی- جنوبی به تنهایی قابل توجه نیست. دنبال کننده در حالت دو محوره بیشترین دریافت تابش خورشید و در نتیجه بالاترین توان بیشینه (بین 83 تا 142 وات) را در طول روز دارد.

به طور کلی، میانگین توان تولیدی روزانه صفحه فتوولتائیک، در حالت تک محوره شمالی- جنوبی برابر صفحه فتوولتائیک ثابت، تک محوره

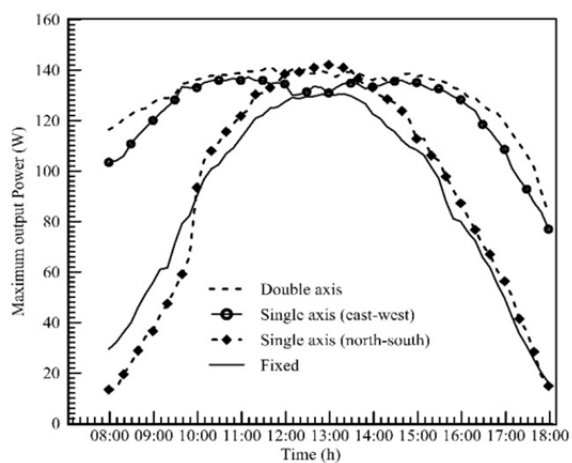


Fig. 7 Maximum output power of the photovoltaic module at the different tracking modes

شکل 7 توان بیشینه تولیدی صفحه فتوولتائیک در حالت های متفاوت در طول روز

شمالی- جنوبی، تک محوره شرقی- غربی و دو محوره به ترتیب باعث افزایش 5.03، 33.75 و 38.78 درصدی در انرژی تابش دریافتی از خورشید می شود. "شکل 12" انرژی الکتریسیته تولیدی صفحه فتوولتائیک در حالت های ثابت، متحرک دو محوره، تک محوره شرقی- غربی و تک محوره شمالی- جنوبی نشان می دهد. در حالت متحرک دو محوره، 1327 وات ساعت، در حالت تک محوره شرقی- غربی، 1150 وات ساعت و در حالت ثابت برابر 961 وات ساعت رسید. نتایج نشان داد انرژی الکتریسیته در حالت تک محوره شرقی- غربی، تک محوره شمالی- جنوبی و دو محوره به ترتیب برابر 4.82، 31.43 و 36.25 درصدی نسبت به حالت ثابت بدست آمد.

"شکل 13" تغییرات زاویه اوج صفحه فتوولتائیک در حالت دو محوره و تک محوره شمالی- جنوبی را نسبت به تغییرات زاویه اوج خورشیدی نشان می دهد. همان طور که در پاراگراف دوم نتایج و بحث، در خصوص شدت تابش دریافتی صفحه خورشیدی بیان گردید، در ابتدای روز مخزن های سیال در حالت شمالی- جنوبی به صورت برابر نور خورشید را دریافت می کنند، در نتیجه تغییرات زاویه صفحه فتوولتائیک بسیار کمتر از حالت دو محوره اتفاق می افتد. زاویه مازول در ساعت 10 صبح از 27 درجه به 67 درجه تغییر کرد و تا ساعت 5:30 تغییری در زاویه مازول رخ نداد. نتایج نشان داد دنبال کننده

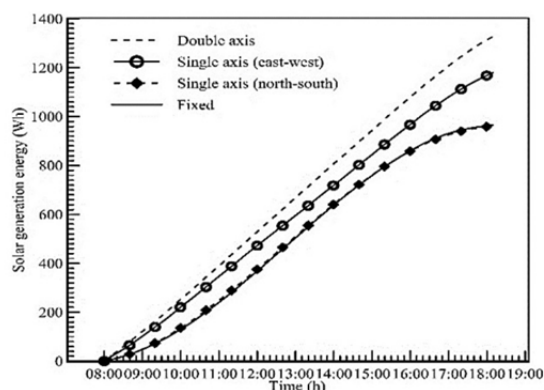


Fig. 12 Electricity generated by the PV module at the modes of east-west, north-south, two-axis and fixed tracking

شکل 12 انرژی الکتریسیته تولیدی صفحه فتوولتائیک در راستای شرقی- غربی، شمالی- جنوبی، دو محوره و ثابت

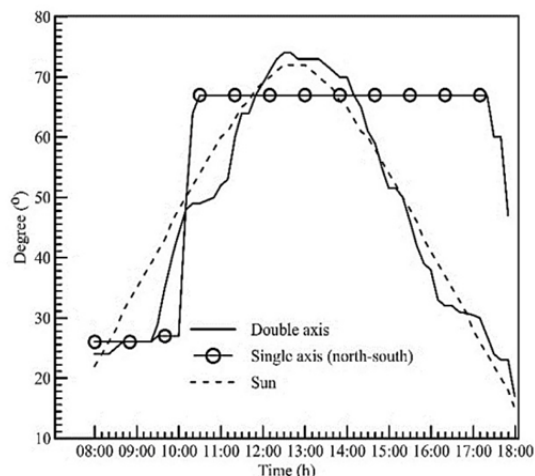


Fig. 13 Variations of zenith angle at the double axis and north-south single axis tracker

شکل 13 تغییرات زاویه اوج خورشیدی در دنبال کننده دو محوره و تک محوره شمالی- جنوبی

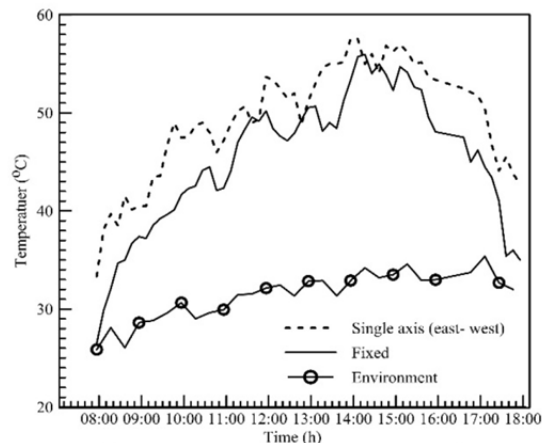


Fig. 10 Module temperature at the east-west single axis mode of tracking

شکل 10 دمای صفحه فتوولتائیک در حالت تک محوره شرقی- غربی

دمای کاری صفحه های فتوولتائیک متحرک، به ویژه در ساعت های ابتدایی و انتهای روز، بالاتر از دمای صفحه فتوولتائیک ثابت است که به علت افزایش اختلاف تابش دریافتی صفحه های فتوولتائیک، در این ساعت ها می باشد. حداکثر دمای صفحه فتوولتائیک در حالت دو محوره بود که به 58 درجه سلسیوس رسید. به طور میانگین اختلاف دمای صفحه فتوولتائیک در حالت دو محوره، تک محوره شرقی- غربی، تک محوره شمالی- جنوبی و ثابت نسبت به دمای محیط به ترتیب برابر 18، 14، 11 و 9 درجه سلسیوس می باشد.

"شکل 11" انرژی تابشی دریافتی صفحه فتوولتائیک را در حالت های ثابت، متحرک دو محوره، تک محوره شرقی- غربی و تک محوره شمالی- جنوبی نشان می دهد. بالاترین دریافت انرژی خورشیدی روزانه در حالت دو محوره، برابر 10378 وات ساعت و کمترین مقدار آن در حالت تک محوره شمالی- جنوبی، برابر 7033 وات ساعت، مشاهده گردید. انرژی شدت تابش در حالت تک محوره شرقی- غربی برابر 9039 وات ساعت به دست آمد. در نهایت نتایج تحقیق نشان داد، بکارگیری دنبال کننده به صورت تک محوره

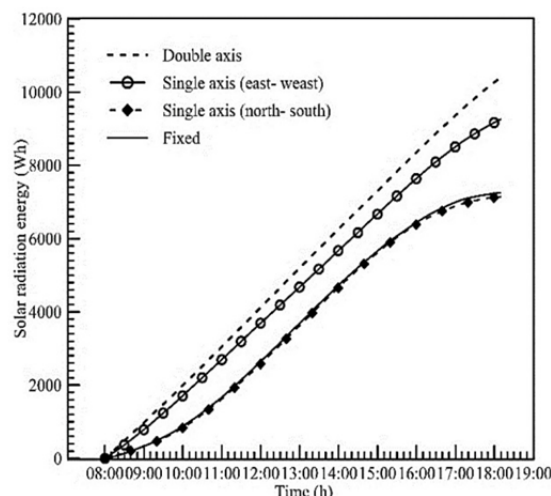


Fig. 11 Solar radiation energy on the module at the modes of east west, north-south, double-axis and fixed modes of tracking

شکل 11 انرژی تابش صفحه فتوولتائیک در راستای شرقی- غربی، شمالی جنوبی، دو محوره و ثابت

جدول 3 هزینه های ثابت و متغیر استفاده از دنبال کننده خورشیدی
Table 3 Capital and operating costs of the solar tracker

نوع	شرح	هزینه (ریال)
ثابت	الکتروموتور	950000
	مدار الکترونیکی	200000
	جعبه دنده	100000
	جک نیوماتیک	500000
	لوله، اتصالات و مخزن ها	150000
	گاز مایع نفتی	30000
	سایر	300000
متغیر	جمع هزینه های ثابت	2230000
	استهلاک (10% هزینه ی ثابت) [25]	223000
	تعمیر و نگهداری (5% هزینه ی ثابت) [25]	11150
	جمع هزینه های متغیر	234150

خورشیدی برای روشنایی 10 سال به دست آمد که دلیل آن ارزان بودن انرژی در کشور ایران اعلام شد [26]. نتایج راجعاً و راجان نشان داد دوره بازگشت سرمایه دنبال کننده تک محوره 3 سال و دو محوره ها 3.5 تا 5 سال طول می کشد [27].

$$(13) \quad \text{هزینه ثابت} = \frac{\text{هزینه متغیر} - \text{درآمد}}{\text{دوره بازگشت سرمایه}}$$

7- نتیجه گیری

در تحقیق انجام شده عملکرد تجربی یک سامانه دنبال کننده خورشیدی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش های مربوط به ارزیابی سامانه مورد نظر در حالت دو محوره، تک محوره شرقی - غربی و تک محوره شمالی - جنوبی انجام شد. نتایج حاصل با یک صفحه فتوولتائیک مشابه در حالت ثابت (نصب شده با زاویه اوج 30 درجه به سمت جنوب) مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان داد که به طور میانگین، افزایش انرژی تابش خورشیدی دریافتی در صفحه های فتوولتائیک متحرک با محور شمالی - جنوبی، محور شرقی - غربی و دو محوره نسبت به نوع ثابت، به ترتیب 5.03، 33.75 و 38.78 درصد بود و انرژی الکتریسیته تولیدی آن ها به ترتیب 4.82، 31.43 و 36.25 درصد بیشتر شد. بالاترین اختلاف بین تابش دریافتی و توان تولیدی صفحه های متحرک با حالت ثابت در ساعات های ابتدایی و انتهایی روز بود. دنبال کننده در حالت دو محوره بیشترین دریافت تابش خورشید و در نتیجه بالاترین توان بیشینه (بین 83 تا 142 وات) را در طول روز داشت. صفحه های فتوولتائیک متحرک، در مقایسه با نوع ثابت دمای کاری بالاتری داشتند که این امر می تواند دلیلی بر توصیه آن ها برای استفاده در سامانه های فتوولتائیک - گرمائی باشد. سامانه مورد ارزیابی توانست خورشید را در راستای محور شرقی - غربی، با اختلاف 0.6 درصد و در راستای شمالی - جنوبی، با اختلاف 8 درصد دنبال کند. نتایج نشان داد بکارگیری دنبال کننده غیرفعال، به صورت تک محوره، در حالت شمالی - جنوبی، منجر به افزایش تولید نمی شود و تنها زمانی که با یک دنبال کننده در حالت شرقی - غربی ترکیب شود، افزایش تولید انرژی را به همراه دارد. دوره بازگشت سرمایه نصب دنبال کننده ترکیبی، حدود 3.1 سال برآورد گردید که نشان دهنده توجیه پذیری اقتصادی به کارگیری آن در سامانه های فتوولتائیک می باشد.

8- پیوست

در حالت تک محوره شمالی - جنوبی، توانایی چندانی در دنبال کردن خورشید ندارد. به طور میانگین، اختلاف زاویه اوج صفحه فتوولتائیک نسبت به خورشید در حالت دو محوره برابر 8 درصد و در حالت تک محوره شمالی - جنوبی برابر 38 درصد به دست آمد.

"شکل 14" تغییرات زاویه راستای خورشیدی صفحه فتوولتائیک نسبت به خورشید با نشان می دهد. با توجه به "شکل 14" در این محور، اختلاف زاویه صفحه فتوولتائیک نسبت به خورشید حدود 0.6 درصد می باشد. یک دنبال کننده خورشیدی براساس اصل تاریخ زمانی توسط فتح آبادی ارزیابی شد که خطای دنبال کننده برابر 0.46 درصد گزارش شده است [24]. یک دنبال کننده تک محوره با استفاده از حس گرهای نوری توسط وانگ و لو مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد خطای دنبال کننده کمتر از 1 درصد بود [11].

6- تحلیل اقتصادی استفاده از دنبال کننده خورشیدی

به منظور بررسی توجیه اقتصادی استفاده از دنبال کننده، هزینه های اولیه (ثابت) و متغیر (جاری) آن تعیین گردید. در جدول 3 هزینه های ثابت و متغیر لازم برای استفاده از دنبال کننده خورشیدی پیشنهادی، آورده شده است. با توجه به جدول، در مجموع، هزینه ی اولیه ی مورد نیاز برای تهیه ی تجهیزات مورد نیاز دستگاه حدود 2230000 ریال بود که الکتروموتور، بالاترین سهم را در آن داشت. در ادامه، با در نظر گرفتن میانگین 5.2 ساعت تابش بیش از 1000 وات بر متر مربع برای شهر کرمان [18]، انرژی الکتریکی تولیدی توسط ماژول 180 واتی در 360 روز از سال، حدود $180W \times 5.2h/day \times 360 day/year = 337 kWh/year$ برآورد گردید. با توجه به افزایش 36.25 درصدی انرژی الکتریکی تولیدی ماژول، در صورت استفاده از دنبال کننده دو محوره، انرژی الکتریکی سالانه آن حدود 459 kWh تخمین زده شد.

با توجه به قیمت فروش هر کیلووات ساعت انرژی الکتریکی فتوولتائیک (حدود 8000 ریال)، افزایش درآمد سالانه حاصل از نصب دنبال کننده مورد نظر، حدود 976000 ریال بود. در نهایت، دوره بازگشت سرمایه با استفاده از رابطه (13) حدود 3.1 سال محاسبه گردید که براساس سودهای بانکی در کشور (کمتر از 20 درصد)، مقداری قابل قبول می باشد. در تحقیق انجام شده توسط مرتضی پور و همکاران دوره بازگشت سرمایه در استفاده از انرژی

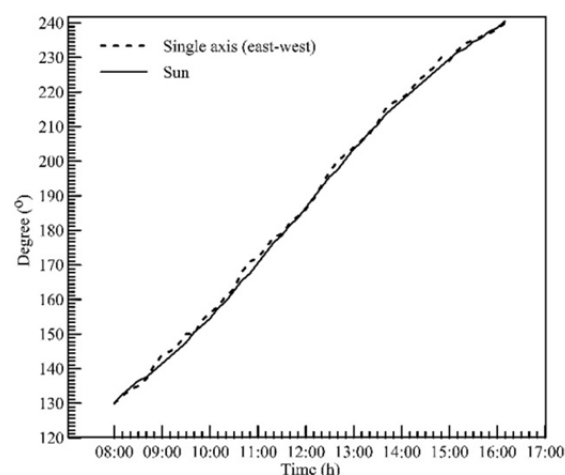


Fig. 14 variations of azimuth angle at the double axis and east-west single axis tracker

شکل 14 تغییرات زاویه راستای خورشیدی در دنبال کننده دو محور و تک محوره شرقی - غربی

جدول 4 مشخصات ابزار اندازه گیری استفاده شده در آزمایش

ردیف	نوع دستگاه	مشخصات
1	سولار آنالایزر	مدل PROVA 200A محصول شرکت TES کشور تولید کننده: تایوان محدوده اندازه گیری ولتاژ 1mV تا 60V محدوده اندازه گیری جریان 0.1mA تا 6A اندازه گیری بیشترین ولتاژ و جریان در توان ماکزیمم اندازه گیری ولتاژ در حالت مدار باز اندازه گیری جریان در حالت اتصال کوتاه محاسبه بازده سلول
2	تابش سنج	مدل TES 1333 R محصول شرکت TES کشور تولید کننده: تایوان محدوده اندازه گیری 2 تا 2000 وات بر متر مربع
3	حسگر دما	مدل SMT 160 دقت 0.1 درجه سلسیوس محدوده اندازه گیری 30- تا 130+ درجه سلسیوس
4	ترانسمیر دما	مدل TM-1233 محصول شرکت مهندسی تیکا کشور تولید کننده: ایران
5	شیب سنج	مدل CST دقت اندازه گیری 1 درجه محدوده اندازه گیری 0 تا 90 درجه

9- فهرست علائم

θ_z	زاویه اوج (°)	A_c	مساحت سطح صفحه فتوولتائیک (m^2)
ϕ	عرض جغرافیایی (°)	E	معادله زمان (min)
ω	زاویه ساعتی خورشید (°)	E_g	انرژی خالص تولیدی (Wh)
ζ_{el}	بازده سلول فتوولتائیک (درصد)	$I(t)$	شدت تابش خورشید بر حسب (Wm^{-2})
زیر نویس ها		L	طول جغرافیایی (°)
m	موتور الکتریکی	L_s	فاصله زاویه ای نسبت به گرینویچ (°)
p_v	صفحه فتوولتائیک	n	تعداد روز از ابتدای سال میلادی
s	خورشید	P_m	توان مصرفی موتور الکتریکی (W)
		P_{pv}	توان صفحه ای فتوولتائیک (W)
		t	تعداد ساعت قبل و بعد از ظهر (h)
		Time	زمان محلی (h)
		Time _s	زمان خورشیدی (h)
		U	عدم قطعیت
		F	پارامتر مورد اندازه گیری
		$\bar{F}$	میانگین هر پارامتر
		m	تعداد اندازه گیری

علائم یونانی

β	زاویه شیب (°)	γ_s	زاویه راستای خورشیدی (°)
δ	زاویه میل (°)	δ_s	زاویه سمت الرأس خورشیدی (°)
η	بازده الکتریکی صفحه فتوولتائیک		

10- مراجع

- [1] R. Rawat, S. Kaushik, R. Lamba, A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 1506-1519, 10.1016/j.rser.2015.12.228, 2016.
- [2] S. Racharla, K. Rajan, Solar tracking system – a review, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 80, No. 2, pp. 1-10, 2017.
- [3] G. Liu, A. O. Baba, L. Zhu, Hybrid controller for dual axes solar tracking system, *Control Conference, 2017 36th Chinese*, China, Dalian, July, 26-28, 2017.
- [4] F. Afrin, T. Titirsha, S. Sanjidah, A. Siddique, A. Rabbani, Installing dual axis solar tracker on rooftop to meet the soaring demand of energy for developing countries, *India Conference, 2013 Annual IEEE*, India, Mumbai, Dec, 13-15, 2013.
- [5] R. Tejwani, C. S. Solanki, 360° sun tracking with automated cleaning system for solar PV modules, *Photovoltaic Specialists Conference, 2010 35th IEEE*, USA, Honolulu, June, 20-25, 2010.
- [6] A. Kassem, M. Hamad, A microcontroller-based multi-function solar tracking system, *Systems Conference, 2011 IEEE International*, Canada, Montreal, April, 4-7, 2011.
- [7] S. C. Baer, *Summer/winter solar control system*, U.S. Patent No. 4,505,255. Washington, DC ed: Google Patents, 19 Mar. 1985.
- [8] Y. El-Tous, O. O. Badran, A. Al-Mofleh, Thermal evaluation of a sun tracking solar cooker, *Journal homepage: www. IJEE. IEEEFoundation. org*, Vol. 3, No. 1, pp. 83-90, 2012.