

بهبود بازدهی و هزینه‌ی تولید انرژی در سیستم‌های فوتوولتائیک با استفاده از مکانیزم ردیابی هوشمند

احسان رضا قلی‌زاده^۱، نسرين دخت باطنی پور^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد دماوند - دماوند - ایران

ehsan.ghz.m@gmail.com -

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران شمال - تهران - ایران

batenipour_nd@srbiau.ac.ir - batenind@gmail.com

چکیده: امروزه سیستم‌های فوتوولتائیک با توجه به کاربرد گسترده‌ای که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از کاربردهای مهم این سیستم‌ها به منظور تامین انرژی برای مراکز حساس خدمات عمومی، امنیتی و انتظامی در شرایط بحرانی است. کاربرد دیگر آن‌ها در مراکز مستقر در مناطق کوهستانی و صعب العبور، راهداری‌ها و ایستگاههای رله بیسیم می‌باشد. در این مقاله، برای بهبود بازدهی از سیستم فوتوولتائیک متحرک دو محوره به جای سیستم فوتوولتائیک ثابت استفاده شده است. به طور طبیعی انتظار می‌رود با اضافه شدن تجهیزات ردیابی و ساختار متحرک هزینه‌ی سیستم افزایش یابد. برای کاهش هزینه از الگوی ردیابی هوشمند استفاده شده است که بدون نیاز به سنسور تشخیص موقعیت خورشید، با توجه به موقعیت جغرافیایی محل نصب پنل خورشیدی و تقویم نجومی منطقه‌ای مسیر حرکتی خورشید را تولید می‌کند. ابتدا، موتور مورد استفاده در ردیاب و واحد کنترل ردیاب به تفصیل بررسی و در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد. سپس منحنی‌های توان پرتوهای خورشیدی، توان دریافتی و توان تولیدی پنل خورشیدی و همچنین بازدهی برای هر دو سیستم ثابت و متحرک محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان می‌دهد سیستم متحرک می‌تواند تقریباً کل توان حاصل از پرتوهای خورشیدی را دریافت نماید که به بازدهی ۲۰/۰۲ درصد منجر می‌شود در حالی که بازدهی سیستم ثابت ۱۴/۱۶ درصد است. علاوه بر این، تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد نسبت هزینه به بازدهی برای سیستم ثابت و متحرک به ترتیب برابر ۱۹۵۹ و ۱۷۸۵ دلار به ازای یک درصد بازدهی است که نمایانگر کاهش هزینه‌ی تولید انرژی در سیستم فوتوولتائیک متحرک مبتنی بر ردیابی هوشمند است.

واژه‌های کلیدی: ردیاب خورشیدی، ردیاب دو محوره، ردیابی هوشمند، سیستم فوتوولتائیک، بازدهی.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۹/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۹/۱۶

نام نویسنده مسئول: نسرين دخت باطنی پور

۱- مقدمه

امروزه با توجه به مباحث زیست محیطی و مسائل اقتصادی، استفاده از سیستم‌های فوتولتائیک و بهره‌برداری از انرژی خورشید به عنوان منبع تأمین انرژی پاک و تجدید پذیر که موارد کاربرد گسترده‌ای دارد مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است و تلاش‌های بسیاری در این زمینه انجام می‌شود [۱].

یکی از کاربردهای مهم این سیستم‌ها در حوزه شهری به عنوان منبع تأمین انرژی برای مراکز حساس خدمات عمومی، امنیتی و انتظامی در شرایط بحرانی است که در اثر وقوع حوادث غیر مترقبه طبیعی و غیر طبیعی، شبکه توزیع برق شهری دچار اختلال شده است و یا استفاده از آن می‌تواند خطر جانی داشته باشد و امنیت شهروندان را تهدید کند. کاربرد دیگر آنها در مراکز مستقر در مناطق کوهستانی و صعب العبور، راهداری‌ها و ایستگاه‌های رله بیسیم است که دسترسی شبکه توزیع برق به آنها به سختی میسر می‌شود. برخی شهرها جهت تأمین انرژی روشنایی معابر، ایستگاه‌های اتوبوس، تابلوهای روان هشدار دهنده ترافیکی و چراغ‌های راهنمایی و رانندگی از پنل‌های خورشیدی استفاده می‌کنند.

بهبود تکنولوژی ساخت سلول‌های خورشیدی که یکی از اجزای مهم سیستم‌های فوتولتائیک هستند و افزایش راندمان تبدیل آن‌ها یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم صنعت فوتولتائیک است [۲، ۳]. یکی دیگر از زمینه‌های مهم این صنعت طراحی سیستم‌های ردیاب خورشیدی است. این سیستم‌ها مسیر حرکتی روزانه و سالانه‌ی خورشید را ردیابی کرده و در هر نقطه‌ی جغرافیایی با توجه به موقعیت خورشید، جهت قرار گرفتن پنل‌های خورشیدی را به گونه‌ای تغییر می‌دهند که همواره تابش خورشید به صورت عمود بر صفحات سلول خورشیدی باشد تا ماکزیمم توان توسط سلول دریافت گردد. گروهی از سیستم‌های فوتولتائیک که از ردیاب خورشیدی استفاده می‌کنند را سیستم‌های متحرک می‌نامند که با توجه به نوع سیستم ردیابی خود انواع مختلفی دارند [۴]. سیستم‌های متحرک در مقایسه با سیستم‌های ثابت که از ردیاب استفاده نمی‌کنند توان بیشتری از نور خورشید را دریافت می‌کنند و راندمان بیشتری دارند هر چند ساختار آنها پیچیده تر و در نتیجه گران تر هستند.

در سال ۱۹۷۵ اولین سیستم ردیاب خورشیدی توسط مک فی^۱ رونمایی گردید. در این سیستم از الگوریتمی استفاده شده بود که بیشترین توان دریافتی و شدت چگالی توزیع در یک

سیستم دریافت کننده‌ی نور خورشیدی را محاسبه می‌کرد. این سیستم با کمک ۴۸۴ آینه که هر کدام یک المان جداگانه را تشکیل می‌دادند و با استفاده از جمع نتایج حاصل از تمامی این المان‌ها امکان تشخیص موقعیت خورشید با دقت ۰/۵ تا ۱ درجه را داشت. چندین سال بعد سما^۲ و امامورا^۳ با استفاده از یک میکروپروسسور ساده موفق به ساخت ردیابی شدند که با دقت بالاتری به سمت خورشید قرار می‌گرفت [۵].

چون-شنگ وو^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ی خود ردیاب دومحوره‌ای ارائه نمودند که از ۴ سنسور خورشیدی استفاده می‌کرد تا در نبود خورشید از حرکت سیستم جلوگیری کند. این ردیاب می‌توانست با استفاده از سنسور تشخیص موقعیت خورشید و مازول زمان سنج بلادرنگ، موقعیت نصب سیستم را تشخیص دهد و مسیر حرکتی خورشید را استخراج نماید [۶].

در سال ۲۰۱۰ یوان^۵ و ونچنگ^۶ با استفاده از میکروکنترلر ARM ۳۲ بیتی، دنبال گر دومحوره‌ای جهت ردیابی خورشید ساختند که در شرایط آب و هوایی بد با دقت بسیار بالا کار می‌کرد. آن‌ها برای ردیابی خورشید از پردازش تصویر و از سنسور تشخیص موقعیت خورشید استفاده کردند [۷].

در مقاله‌ی دیگری که در سال ۲۰۱۰ توسط تنویر^۷ و همکارانش ارائه شد، در ساخت ردیاب دومحوره‌ای یک میکروکنترلر ATMEGA۳۲ ساخت شرکت ATMEL جهت انجام اعمال کنترلی و پردازشی استفاده شد. آنها برای تعیین موقعیت خورشید از مقاومت‌های تابع نور از جنس CdS و برای حرکت سیستم از موتور جریان ثابت پله‌ای استفاده کردند. در این دنبال گر عمل ردیابی خورشید از طریق خواندن ولتاژی که مدار سنسورهای مقاومتی روی دو کانال آنالوگ قرار می‌داد، انجام می‌شد. در این سیستم در شرایط بد آب و هوایی اگر ولتاژی که از کانال‌های آنالوگ میکرو خوانده می‌شد مطابق الگوریتم نرم‌افزاری نبود، عملیات ردیابی متوقف می‌شد [۸].

در سال ۲۰۱۵ چن^۸ و همکارانش در مقاله‌ای یک ردیاب دومحوره‌ی خورشیدی ارائه نمودند که هسته‌ی کنترل و پردازش آن یک FPGA بود. در این ردیاب با استفاده از توابع هوشمند به صورت اتوماتیک در طول روز تابع ردیابی اجرا می‌شد و

² Semma

³ Imamura

⁴ Chun-Sheng Wu

⁵ Yuan

⁶ Wencheng

⁷ Tanvir

⁸ Chen

¹ McFee

یکدیگر مقایسه می نماییم. در بخش چهارم از دیدگاه اقتصادی سیستم را بررسی می کنیم و شاخص بهره‌وری سیستم متحرک نسبت به ثابت را محاسبه می نماییم. در انتها در بخش پنجم مقاله نتایج حاصل را جمع بندی می کنیم.

۲- پیاده سازی الگوی هوشمند ردیاب خورشیدی

در ردیاب خورشیدی دومحوره که بر اساس الگوریتم هوشمند عمل می کند باید مسیر حرکتی خورشید بر اساس موقعیت جغرافیایی تولید شود. این الگوی ردیابی که در شکل (۱) نشان داده شده است از سه بخش اصلی تشکیل می شود.

بخش اول بلوک تولیدکننده ی مسیر حرکتی خورشید است که با استفاده از تقویم نجومی و موقعیت جغرافیایی محل نصب پنل سلول های خورشیدی و بر اساس تاریخ موردنظر، زمان طلوع و غروب خورشید و همچنین موقعیت قرار گرفتن خورشید در آسمان را در هر زمان از روز مشخص می کند. در خروجی این بخش موقعیت قرار گرفتن خورشید در آسمان و یا به اصطلاح مسیر حرکتی خورشید با تعیین زاویه ی ارتفاع و زاویه ی سمت آن مشخص می گردد.

خروجیهای بخش اول یعنی زاویه ی سمت و ارتفاع خورشید به عنوان پارامترهای ورودی به بخش دوم که واحد پردازشگر ردیاب است داده می شوند. واحد پردازشگر ردیاب می تواند بر اساس مدل ردیابی که در آن تعریف شده است عمل ردیابی را یا به طور پیوسته و یا به صورت گسسته در بازه های زمانی مشخص انجام دهد. به علاوه، این واحد وظیفه دارد در پایان روز پنل خورشیدی را به موقعیت اولیه ی مناسب خود بازگرداند تا در طلوع روز بعد عمل ردیابی از موقعیت مناسب آغاز گردد. محاسبات مربوط به تصمیم گیری در مورد انجام عمل ردیابی نیز در این واحد انجام می شود. بدین ترتیب که از یک طرف بر اساس بار متصل به سیستم فوتوولتائیک، انرژی لازم برای انجام حرکت و از طرف دیگر میزان افزایش انرژی دریافت شده در صورت انجام حرکت را محاسبه می نماید. سپس از مقایسه ی آن ها تصمیم می گیرد که آیا پنل خورشیدی را حرکت دهد یا خیر. در صورت تصمیم برای انجام حرکت اطلاعات مربوط به سمت و ارتفاع موقعیت مطلوب جدید برای اجرای ردیابی به واحد کنترل ردیاب اعمال می گردد.

بخش سوم واحد کنترل ردیاب است که با دریافت اطلاعات سمت و ارتفاع جدید و مقایسه ی آن با سمت و ارتفاع کنونی سیگنال های کنترلی مورد نیاز برای حرکت موتورها را تولید می کند. برای تغییر زاویه در محورهای سمت و ارتفاع از دو موتور

همچنین پس از پایان روز و در طول شب سیستم فوتوولتائیک به مکان اولیه ی خود (مکان طلوع خورشید در روز آینده) باز می گشت. در این سیستم به واسطه ی وجود تابع تأخیر، توان مصرفی موتور کاهش یافت. علاوه بر آن عملکرد سیستم به گونه ای بود که بدون نیاز به کاربر و به صورت اتوماتیک از حالت دومحوره به تک محوره و بالعکس تغییر وضعیت می داد. در این دنبال گر از الگوریتم PSO و منطق فازی استفاده شده بود [۹].

اخیرا در سال ۲۰۱۹ کانگ^۹ و همکارانش برای افزایش بهره‌وری در طراحی سایبان های فوتو ولتائیک خود علاوه بر پنل های خورشیدی با راندمان بالا از ردیابهای هوشمند مبتنی بر سنسور استفاده کردند [۱۰، ۱۱]. زو^{۱۰} و همکارانش نیز عملکرد پنل های خورشیدی دو طرفه همراه با ردیابی دو محوره را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در مقاله ای که توسط علامه زاده ارائه شد برای ردیابی دومحوره از سنسور مقاومت وابسته به نور و کنترلر PID استفاده شد [۱۳]. در مراجع نامبرده عمل ردیابی بر اساس مدارات کنترلی و سنسورهای حساس به نور انجام شده است.

در این مقاله ابتدا سیستم فوتوولتائیک ثابت و متحرک دومحوره را شبیه سازی و راندمان هر یک را محاسبه نمودیم. سپس به منظور بررسی صرفه ی اقتصادی استفاده از سیستم متحرک به جای سیستم ثابت، هزینه ی صرف شده برای افزایش راندمان هر دو سیستم را با یکدیگر مقایسه کردیم. برای کاهش هزینه ی ردیابی به جای استفاده از سنسور تشخیص موقعیت خورشید، عمل ردیابی را بر اساس الگوریتم هوشمند مسیریابی انجام دادیم که این کار در مقالات قبلی انجام نشده است. این الگوریتم مسیر حرکتی خورشید را بر اساس ویژگی هایی نظیر طول و عرض جغرافیایی محل نصب پنل خورشیدی، ارتفاع آن نسبت به سطح دریا، تاریخ و زمان انجام ردیابی تولید می کند. لذا طراحی و پیاده سازی آن مستلزم کد نویسی و انجام محاسبات پیچیده است. استفاده از الگوریتم هوشمند با وجود پیچیدگی های محاسباتی آن، به حذف هزینه های مربوط به خرید، نصب و نگهداری سنسور منجر می گردد که سیستم ردیاب را به صرفه ی اقتصادی نزدیک تر می کند.

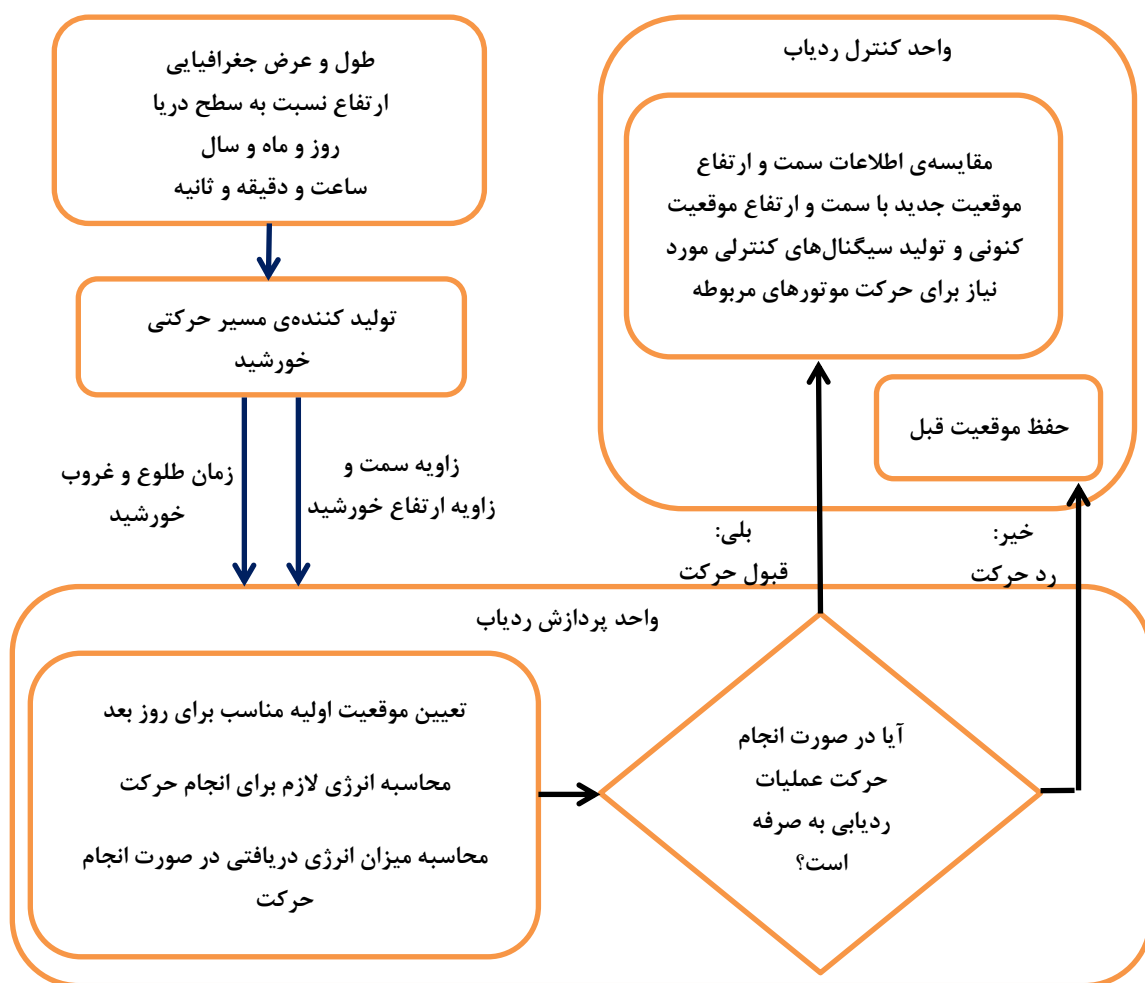
در ادامه ی مقاله در بخش دوم سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره و نحوه ی شبیه سازی بلوک های سازنده ی اصلی آن را تشریح می کنیم. در بخش سوم نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم فوتوولتائیک ثابت و متحرک را به تفصیل بررسی و با

⁹ Kang
¹⁰ Zhu

جدول (۱): مشخصات موتور جریان ثابت
45PA720G/45ZYT75-2430 [۱۴].

مقدار	واحد	نام پارامتر
۱۲	μH	اندوکتانس آرمیچر
۰/۲۱۵۷۴۶۳	$\text{N}\cdot\text{m}$	گشتاور توقف
۳۰۰۰	rpm	سرعت بدون بار
۲۴	V	ولتاژ تغذیه با ولتاژ DC
۱۸۰	mA	جریان بدون بار
۲۴	V	ولتاژ تغذیه‌ی DC هنگام اندازه‌گیری جریان بدون بار

DC جاروبک دار با مشخصه‌ی 45PA720G/45ZYT75-2430 که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است، استفاده می‌کنیم [۱۴]. یک موتور برای کنترل موقعیت در راستای زاویه‌ی سمت و یک موتور برای کنترل موقعیت در زاویه‌ی ارتفاع است تا با چرخش محورهای سمت و ارتفاع، پنل خورشیدی در موقعیت مناسب قرار گیرد و ماکزیمم توان را از پرتوهای تابشی خورشید دریافت نماید.



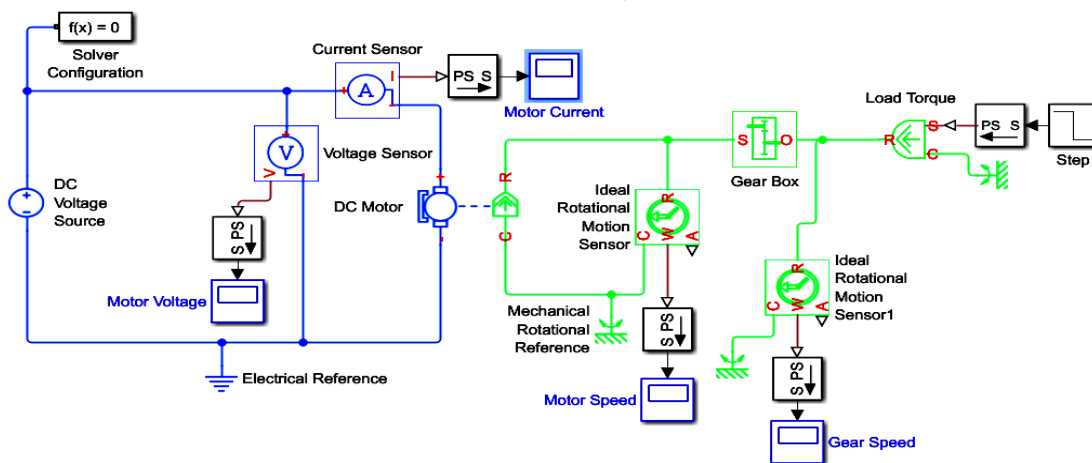
شکل (۱): الگوی ردیابی هوشمند.

البته این امکان وجود دارد که پیش از شروع عملیات ردیابی روزانه، الگوریتم را اجرا و نتایج محاسباتی آن را در حافظه‌ی میکروکنترلرهای ذکر شده ذخیره نمود. در اینصورت با طلوع خورشید و شروع عملیات ردیابی در هر مقطع زمانی، اطلاعات مربوطه از حافظه‌ی میکروکنترلر بازیابی و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الگوریتم بکار برده شده در این ردیاب از نظر حجم حافظه‌ی مورد نیاز این قابلیت را دارد که بر روی میکروکنترلرهای رایج بازار نظیر ATMEGA32 شرکت ATMEL و یا PIC18F46K22 شرکت MICROCHIP پیاده سازی شود. حجم اطلاعات تولید شده توسط این الگوریتم متناسب با بازه‌ی ردیابی (یک ثانیه‌ای، یک دقیقه‌ای، ۱۵ دقیقه‌ای و یک ساعته) متغیر است.

خورشیدی $2 N \cdot m$ و گشتاور لازم برای مقابله با باد $8 N \cdot m$ می باشد. لذا گشتاور کل که به عنوان بار موتور در نظر گرفته می شود $10 N \cdot m$ است.

شکل (۲) مدل مورد استفاده در شبیه سازی عملکرد موتور را نشان می دهد. بار موتور شامل گشتاور لازم برای به حرکت درآوردن پنل خورشیدی و تجهیزات مربوطه در شرایط وزش باد مخالف با سرعت 36 Km/h است. گشتاور معادل با وزن پنل



شکل (۲): الگوی شبیه سازی موتور در نرم افزار متلب.

در محاسبات مربوط به شبیه سازی عملکرد موتور از معادلات (۱) الی (۶) استفاده می شود [۱۵].

$$T_{IG} = T_{OG} / N_T \quad (1)$$

$$T_{IG} = 10 \text{ N} \cdot \text{m} / 720 = 0.01389 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{NM}}{M_{HT}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{3000 \text{ rpm}}{0.21574 \text{ N} \cdot \text{m}}$$

$$V_M = V_{NM} - T_{IG} \times \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right) \quad (3)$$

$$V_M = 3000 \text{ rpm} - 0.01389 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\times \left(\frac{3000 \text{ rpm}}{0.21574 \text{ N} \cdot \text{m}} \right) = 2806 \text{ rpm}$$

$$V_{OG} = V_M / N_T \quad (4)$$

$$V_{OG} = 2806 \text{ rpm} / 720 = 3.89 \text{ rpm}$$

$$I_{LM} = T_{IG} \times \left(\frac{M_{HC}}{M_{HT}} \right) \quad (5)$$

$$I_{LM} = 0.01389 \text{ N} \cdot \text{m} \times \left(\frac{3 \text{ A}}{0.21574 \text{ N} \cdot \text{m}} \right) = 193 \text{ mA}$$

$$I_{TM} = I_{NM} + I_{LM} \quad (6)$$

$$I_{TM} = 180 \text{ mA} + 193 \text{ mA} = 373 \text{ mA}$$

انجام نمونه‌گیری موقعیت از خروجی گیربکس و اعمال فیدبک به موتور، انجام می‌گردد

شکل (۴) الگوی شبیه‌سازی واحد کنترل در نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد که زاویه‌ی مطلوب جدید را در ورودی دریافت می‌کند. این واحد دارای دو حلقه‌ی فیدبک درونی و بیرونی جهت کنترل زاویه‌ی پِنل خورشیدی در خروجی گیربکس می‌باشد. حلقه‌ی درونی که ورودی آن سرعت شفت موتور است جهت کنترل سرعت موتور بکار برده می‌شود. حلقه‌ی بیرونی که ورودی خود را مستقیماً از زاویه‌ی خروجی گیربکس دریافت نموده است جهت کنترل موقعیت زاویه‌ای پِنل خورشیدی می‌باشد. در این مدار کنترلی پس از دریافت زاویه جدید مورد نظر در ورودی سیستم، اختلاف آن با زاویه‌ی کنونی پِنل خورشیدی محاسبه می‌گردد. نتیجه‌ی این محاسبه پس از عبور از یک کنترل کننده‌ی تناسبی- انتگرالی^{۱۳} که وظیفه کنترل زاویه را دارد، وارد مرحله‌ی بعد می‌گردد. در این مرحله اختلاف آن با سرعت شفت موتور محاسبه و سپس در گین ۵ ضرب و بر ۳۷۷ تقسیم می‌گردد تا در محدوده ولتاژ ورودی قابل قبول تولید PWM^{۱۴} قرار گیرد. عدد ۳۷۷ بیشترین سرعت موتور برحسب رادیان بر ثانیه و عدد ۵ بیشترین دامنه ولتاژ قابل قبول در ورودی واحد تولید کننده PWM است. خروجی واحد تنظیم گین به یک کنترل کننده‌ی تناسبی- انتگرالی دیگر که وظیفه کنترل سرعت را دارد اعمال و سپس وارد واحد اشباع^{۱۵} می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که سیگنال کنترلی در بازه‌ی ۵- تا ۵+ ولت قرار گرفته است. سیگنال خروجی واحد اشباع، هم برای تعیین جهت چرخش موتور و هم پس از اعمال به واحد تولید PWM به منظور تنظیم سرعت موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال تعیین جهت چرخش موتور به پایه REV و سیگنال کنترل سرعت موتور از طریق واحد کنترل PWM به پایه PWM از بلوک پل H اعمال می‌گردد. ولتاژ ۵ ولت در ورودی واحد PWM، معادل ماکزیمم عرض پالس و به مفهوم بیشترین سرعت چرخش موتور می‌باشد. مدار پل H با داشتن جریان خروجی بالا توانایی راه اندازی موتور را دارد. بدین ترتیب جهت و سرعت چرخش موتور کنترل می‌شود. باتوجه به اینکه عمل ردیابی خورشید مستلزم حرکت پِنل خورشیدی با سرعتی بسیار کمتر از سرعت موتور مورد استفاده می‌باشد، در خروجی موتور از یک گیربگس کاهنده استفاده می‌شود که علاوه بر

که در آن‌ها T_{IG} گشتاور ورودی گیربکس یا همان گشتاور خروجی موتور^۱، T_{OG} گشتاور خروجی گیربکس^۲، N_T نسبت تبدیل گیربکس^۳، $\Delta V/\Delta T$ شیب منحنی سرعت-گشتاور، V_{NM} سرعت موتور بدون بار^۴، M_{HT} گشتاور توقف موتور^۵، V_M سرعت موتور تحت بار^۶، I_{LM} جریان ناشی از بار در موتور^۷، V_{OG} سرعت خروجی گیربکس^۸، M_{HC} جریان قفل موتور^۹، I_{TM} جریان کلی موتور^{۱۰} و I_{NM} جریان بدون بار موتور^{۱۱} است.

شکل (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد موتور را نشان می‌دهد. عملکرد موتور به مدت ده ثانیه مورد بررسی قرار می‌گیرد و منحنی‌های ولتاژ موتور، جریان موتور، سرعت موتور و سرعت گیربکس استخراج می‌شوند. ابتدا با اعمال ولتاژ ۲۴۷ موتور بدون بار روشن می‌شود. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌گردد در لحظه‌ی اول به دلیل جریان راه‌اندازی که تقریباً برابر با ۳۸ است، افت ولتاژ شدیدی در موتور ایجاد می‌گردد ولی با گذشت زمان و رسیدن جریان موتور به ۱۸۰mA و ولتاژ موتور به ۲۳/۹۸۷ می‌رسد. پس از گذشت تقریباً یک ثانیه سرعت موتور به سرعت بدون بار ۲۹۹۸rpm می‌رسد که معادل با سرعت ۴/۱۵rpm در گیربکس است. سپس، در ثانیه‌ی پنجم بار $10N \cdot m$ در خروجی گیربکس قرار می‌گیرد که موجب می‌شود در حالت پایدار، سرعت موتور و گیربکس به ترتیب به ۲۸۰۰rpm و ۳/۸۹rpm برسد و از موتور جریان ۳۶۱mA عبور کند. این اعداد که از منحنی‌های شبیه‌سازی به دست آمده اند با اعداد حاصل از معادلات (۱) تا (۶) با تقریب خوبی مطابقت دارند و اختلاف اندک موجود به دلیل خطا در خواندن اعداد از روی منحنی‌ها است.

همان‌گونه که پیش‌ازاین بیان گردید واحد کنترل ردیاب وظیفه‌ی تغییر محورهای سمت و ارتفاع را بر عهده دارد و باید موتور را با سرعت و دقت مناسب به گردش درآورد و در موقعیت مناسب متوقف نماید. بدین منظور لازم است که علاوه بر مدار پل H^{۱۲} که جهت راه اندازی موتور بکار می‌رود، از مدار کنترل سرعت و موقعیت نیز استفاده شود. کنترل سرعت با انجام نمونه‌گیری سرعت از خروجی شفت موتور و کنترل موقعیت با

¹ Input torque of the gearbox or Torque of the motor

² Output torque of the gearbox

³ Gear ratio

⁴ Motor no-load speed

⁵ Motor hold torque or Motor stall torque

⁶ Motor speed under load or Motor speed

⁷ Motor current resulting from the load

⁸ Output speed of the gearbox

⁹ Motor hold current or motor stall current

¹⁰ Motor total current

¹¹ Motor no-load current

¹² H-Bridge circuit

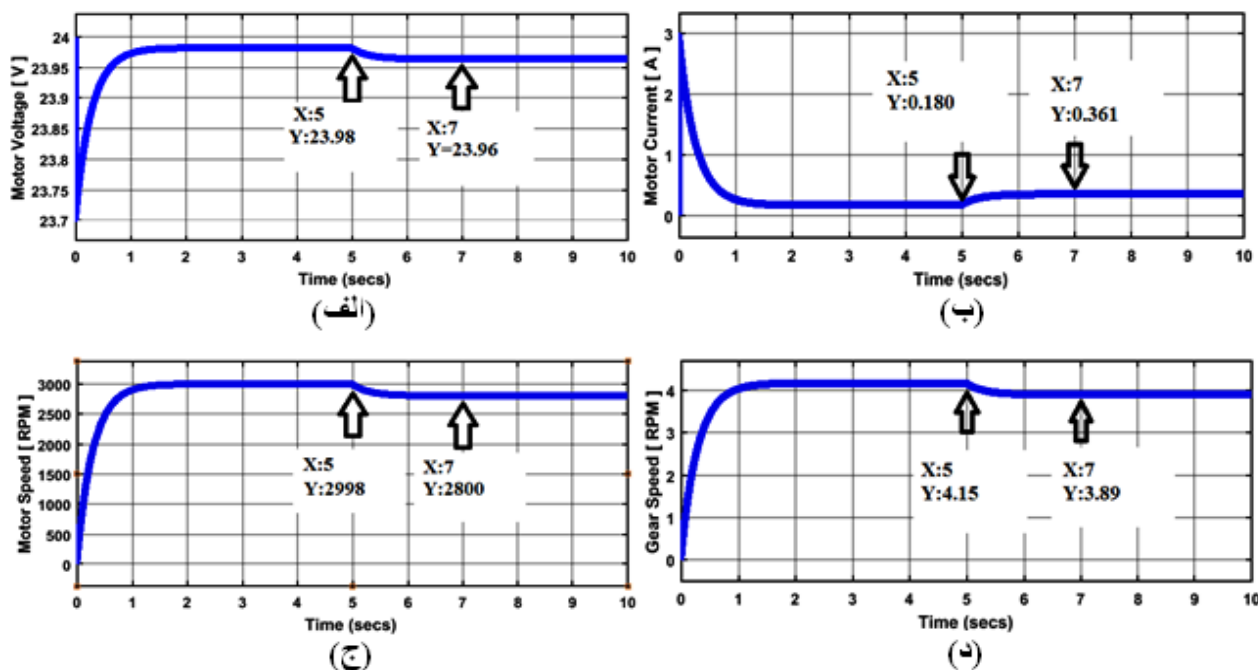
¹³ Proportional-Integral controller

¹⁴ Pulse width modulation

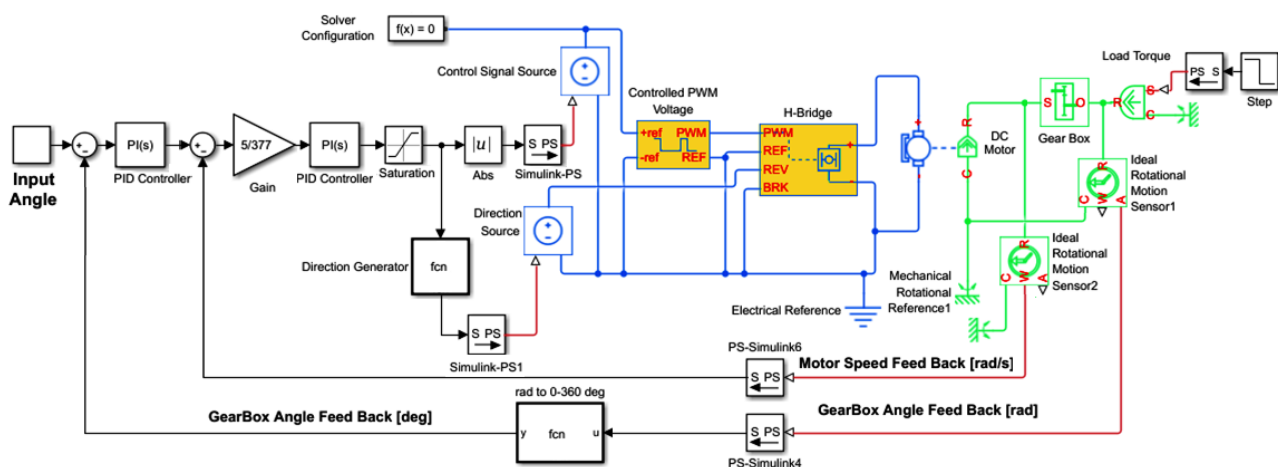
¹⁵ Saturation

می گردد. همان گونه که قبلا ذکر شد برای کنترل زاویه پنل خورشیدی از خروجی گیربکس استفاده می شود.

کاهش سرعت، گشتاور را نیز افزایش می دهد. بنابراین گشتاور $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ مورد نیاز برای حرکت پنل خورشیدی تامین



شکل (۳): منحنی های خروجی موتور: الف- ولتاژ موتور، ب- جریان موتور، ج- سرعت موتور و د- سرعت گیربکس.



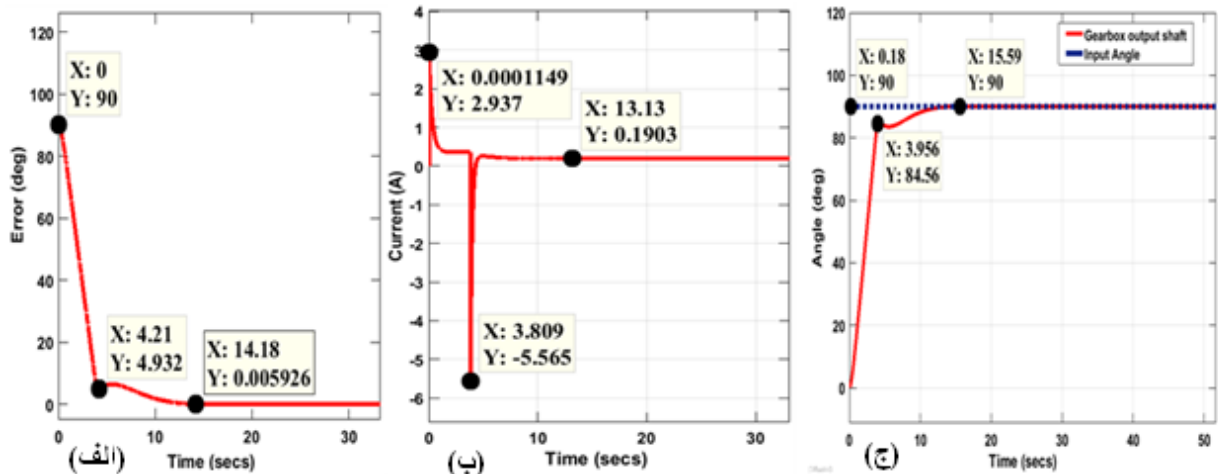
شکل (۴): الگوی شبیه سازی واحد کنترل در نرم افزار متلب.

ابتدا موتور در موقعیت زاویه ای صفر درجه است. با اعمال زاویه ای مطلوب در ورودی واحد کنترل، موتور به حرکت درمی آید تا زاویه ای خروجی را به زاویه مطلوب برساند. از مقایسه ای شکل های (۵-الف) و (۶-الف) ملاحظه می گردد همان گونه که انتظار می رفت برای رسیدن به زاویه ای 180° درجه در مقایسه با زاویه ای 90° درجه زمان طولانی تری لازم است. در شکل های (۵-ب) و (۶-ب) منفی شدن جریان به این معنا است که به موتور یک گشتاور بار مخالف با جهت حرکت آن اعمال

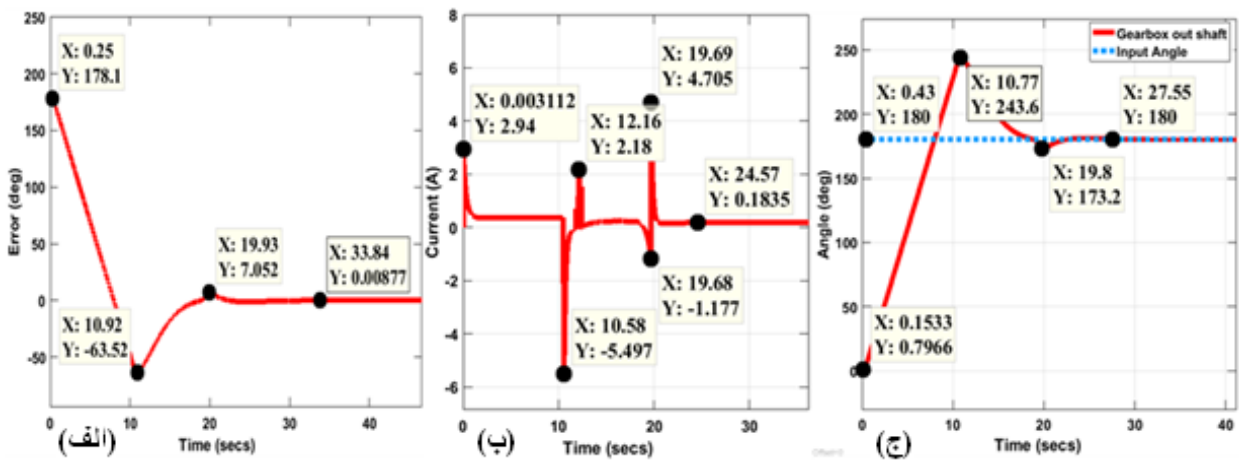
در ادامه به منظور بررسی صحت عملکرد واحد کنترل به عنوان نمونه، یک مرتبه زاویه ای 90° درجه و بار دیگر زاویه ای 180° درجه به ورودی این واحد اعمال گردید و شبیه سازی آن انجام شد. منحنی خطای زاویه ای خروجی نسبت به ورودی، نمودار جریان مصرفی جهت رسیدن به زاویه ای مورد نظر و منحنی تغییرات زاویه ای خروجی که نتایج حاصل از شبیه سازی هستند برای زاویه ای ورودی 90° درجه و 180° درجه به ترتیب در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده اند.

زاویه با سرعت زیاد افزایش می‌یابد. سپس با نزدیک شدن به زاویه‌ی مطلوب سرعت تغییرات زاویه کند می‌شود تا در نهایت به زاویه‌ی مطلوب برسد. همچنین مشاهده می‌گردد رسیدن به زاویه‌ی ۱۸۰ درجه با حرکت رفت و برگشتی موتور همراه است.

می‌گردد که سرعت حرکت آن را کاهش می‌دهد و یا حتی موجب می‌شود موتور در جهت مخالف حرکت کند. با تنظیم پارامترهای واحد کنترل می‌توان حرکت موتور را کنترل نمود تا به صورت هموار و با حرکت پیوسته در موقعیت زاویه‌ی مطلوب قرار گیرد. شکل‌های (۵-ج) و (۶-ج) نشان می‌دهند که در ابتدا



شکل (۵): الف- منحنی خطای زاویه‌ی خروجی نسبت به زاویه‌ی ورودی مطلوب، ب- منحنی جریان مصرفی و ج- منحنی تغییرات زاویه‌ی خروجی در مقایسه با زاویه‌ی ورودی مطلوب برای زاویه‌ی ورودی ۹۰ درجه.



شکل (۶): الف- منحنی خطای زاویه‌ی خروجی نسبت به زاویه‌ی ورودی مطلوب، ب- منحنی جریان مصرفی و ج- منحنی تغییرات زاویه‌ی خروجی در مقایسه با زاویه‌ی ورودی مطلوب برای زاویه‌ی ورودی ۱۸۰ درجه.

جغرافیایی که برای موقعیت جغرافیایی تهران مناسب‌ترین زاویه برای دریافت بیشترین توان تابشی است قرار می‌گیرد. برای سیستم متحرک ابتدا باید تحلیل و بررسی لازم جهت انتخاب بهترین بازه‌ی ردیابی را انجام دهیم. بدین منظور چهار بازه‌ی زمانی یک‌ساعته، ۱۵ دقیقه‌ای، یک دقیقه‌ای و یک ثانیه‌ای را در نظر می‌گیریم و میزان توان مصرفی جهت ردیابی را محاسبه می‌نماییم. نتایج حاصل در جدول (۲) نشان داده شده است.

۳- نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های فوتوولتائیک ثابت و متحرک

در این بخش، سیستم‌های فوتوولتائیک ثابت و متحرک را شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. الگوریتم ردیابی برای هر موقعیت جغرافیایی در کره زمین و هر روز از تقویم قابل اجرا است. به‌عنوان نمونه شهر تهران را انتخاب می‌کنیم و شبیه‌سازی را برای یک روز تابستانی و یک روز پاییزی انجام می‌دهیم. در سیستم ثابت پنل خورشیدی در زاویه‌ی ثابت ۳۰ درجه‌ی عرض

جدول (۲): میزان توان مصرفی ردیاب برای ردیابی خورشید در بازه های مختلف.

بازه های زمانی ردیابی	یک ساعت	۱۵ دقیقه	یک دقیقه	یک ثانیه
متوسط جریان (A)	۱/۹۵۴	۱/۹۵	۱/۹۴۸	۱/۹۴۷
متوسط ولتاژ (V)	۱/۷۶۲	۱/۷۳۲	۱/۷۱۶	۱/۷۱۲
توان مصرفی (Wh)	۴۱/۳	۴۰/۵	۴۰/۱	۳۹/۹

ولتاژ کاهش می یابد. به گونه ای که با ۳۶۰۰ بار تکرار عمل ردیابی در فاصله زمانی یک ساعت، توان مصرفی کل در مقایسه با ردیابی در بازه های یک ساعته کمتر است.

جدول (۲) مقدار توان مصرف شده توسط ردیاب برای حرکت موتورها به منظور نگهداشتن ساختار و تغییر محورهای سمت و ارتفاع را نشان می دهد که با در نظر گرفتن گشتاور بار $10N*m$ محاسبه شده است. علاوه بر این لازم است توان تولید شده در سیستم فوتولتائیک را نیز محاسبه نماییم تا بتوان در مورد انجام عمل ردیابی تصمیم گیری نمود. بدین منظور جدول های (۳) و (۴) توان مصرفی برای انجام ردیابی، توان تولیدی کل حاصل پس از انجام ردیابی و بازدهی سیستم فوتولتائیک دومحوره را به ترتیب در روزهای ۲۴ ام تیرماه و ۲۴ ام آذرماه ۱۳۹۸ نشان می دهند. از مقایسه جدول ها مشاهده می گردد که در روز تابستانی با توجه به طولانی تر بودن طول روز، میزان توان تولیدی توسط سلول خورشیدی و در نتیجه بازدهی ردیابی بیشتر است. همچنین در هر صورت با کاهش بازه ی زمانی ردیابی، بازده افزایش می یابد. با انجام ردیابی در بازه های ۱ دقیقه ای و ۱ ثانیه ای، بازدهی و توان تولیدی در این دو بازه بسیار نزدیک به هم و بیشترین مقدار است. ردیابی در بازه ی یک ثانیه ای که میزان جابجایی آن 0.0417 درجه است، مستلزم داشتن انکودر با دقت ۱۹ بیت است درحالیکه برای ردیابی در بازه ی یک دقیقه ای با جابجایی 0.25 درجه به یک انکودر ۱۴ بیتی نیاز است. با توجه به اینکه قیمت انکودر ۱۹ بیتی تقریباً ده برابر انکودر ۱۴ بیتی است و تفاوت بازدهی حاصل از آنها ناچیز است، در ادامه برای شبیه سازی سیستم متحرک بازه ی زمانی ردیابی یک دقیقه ای را انتخاب می کنیم.

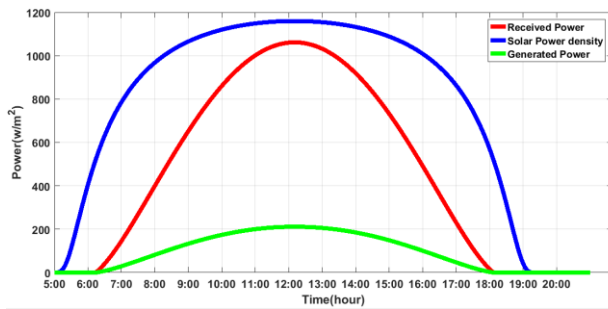
توان مصرفی شامل دو قسمت می باشد. بخشی از آن برای مقابله با باد مخالف و نگهداشتن ساختار در یک موقعیت ثابت و بخش دیگر برای انجام ردیابی و جابجایی زاویه ی قرار گرفتن پنل خورشیدی است. به عبارت دیگر برای نگهداشتن ساختار توان ثابتی مورد نیاز است و در بازه های ردیابی توان مورد نیاز جهت تغییر زاویه پنل به این مقدار ثابت اضافه می شود. هرچه بازه ی زمانی ردیابی بزرگتر باشد، میزان تغییر زاویه بیشتر و در نتیجه توان مورد نیاز نیز بیشتر است. در بازه های زمانی ردیابی کوچک در حد ۱ ثانیه میزان تغییر زاویه بسیار کم و تعداد دفعات ردیابی آنقدر زیاد است که به نظر می رسد حرکت پیوسته است. این حرکت پیوسته با زوایای کم باعث می شود توان مصرفی کاهش یابد. علت کاهش توان را می توان با بیان یک مثال توجیه نمود. فرض نمایید که هم اکنون خورشید در زاویه ی سمت ۲۰ درجه باشد و پس از گذشت یک ساعت در زاویه ی سمت ۳۵ درجه قرار گیرد. اگر بازه ی زمانی ردیابی یک ساعته باشد، پس از گذشت یک ساعت ردیاب باید به یکباره ۱۵ درجه جابجا شود. در صورتی که در ردیابی یک ثانیه ای، ردیاب هر یک ثانیه 0.0417 درجه جابجا می شود و این عمل را در طول یک ساعت ۳۶۰۰ بار تکرار می کند تا در پایان یک ساعت جابجایی ۱۵ درجه ای حاصل شود. در واحد کنترل ردیاب که در شکل (۴) تشریح شد، اختلاف زاویه ی مطلوب (که زاویه ی توقف بعدی سیستم می باشد) با زاویه ی کنونی سیستم که فیدبک آن از خروجی گیربکس گرفته شده است محاسبه می شود و در نهایت بر اساس این اختلاف، ولتاژی جهت کنترل حرکت موتور و چرخش بار متصل به آن تولید می گردد. دامنه این ولتاژ کنترلی تولید شده برای بازه ی ردیابی یک ثانیه ای به مراتب کمتر از بازه ی ردیابی یک ساعته است. با توجه به قانون اهم و ثابت بودن مقاومت سیم پیچ موتور، جریان دریافتی از منبع تغذیه با ولتاژ کنترلی رابطه مستقیم دارد. لذا با انتخاب بازه ی ردیابی یک ثانیه ای و کاهش دامنه ولتاژ کنترلی اعمالی و در نتیجه کاهش جریان عبوری از موتور، توان مصرفی متناسب با مربع یا توان دوم

جدول (۳): مقایسه ی توان مصرفی، توان تولیدی و بازده در صورت ردیابی خورشید در بازه های مختلف در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۴.

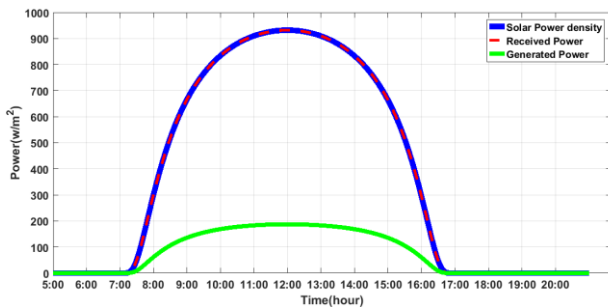
بازه های زمانی ردیابی	یک ساعت	۱۵ دقیقه	یک دقیقه	یک ثانیه
توان تولیدی سلول خورشیدی (Wh)	۱۶۷/۸۵	۱۶۸/۷۳	۱۶۸/۷۹	۱۶۸/۷۹
توان مصرفی ردیاب (Wh)	۴۱/۳	۴۰/۵	۴۰/۱	۳۹/۹
توان کل تولیدی سیستم فوتو ولتائیک (Wh)	۱۲۶/۵۵	۱۲۸/۲۳	۱۲۸/۶۹	۱۲۸/۸۹
بازدهی حاصل از ردیابی (%)	۷۵/۳۹	۷۵/۹۹	۷۶/۲۴	۷۶/۳۶

جدول (۴): مقایسه توان مصرفی، توان تولیدی و بازده در صورت ردیابی خورشید در بازه‌های مختلف در تاریخ ۱۳۹۸/۰۹/۲۴.

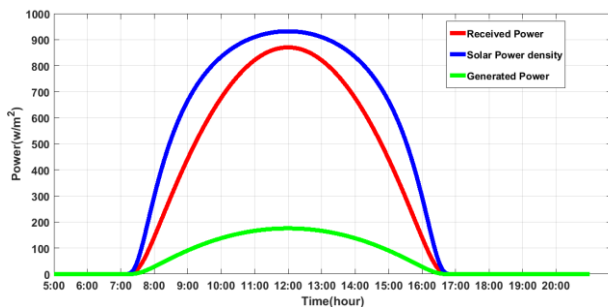
بازه‌های زمانی ردیابی	یک ساعت	۱۵ دقیقه	یک دقیقه	یک ثانیه
توان تولیدی سلول خورشیدی (Wh)	۸۵/۰۳	۸۵/۱۸	۸۵/۱۹	۸۵/۱۹
توان مصرفی ردیاب (Wh)	۴۱/۳	۴۰/۵	۴۰/۱	۳۹/۹
توان کل تولیدی سیستم فوتوولتائیک (Wh)	۴۳/۷۳	۴۴/۶۸	۴۵/۰۹	۴۵/۲۹
بازدهی حاصل از ردیابی (%)	۵۱/۴۲	۵۲/۴۵	۵۲/۹۲	۵۳/۱۶



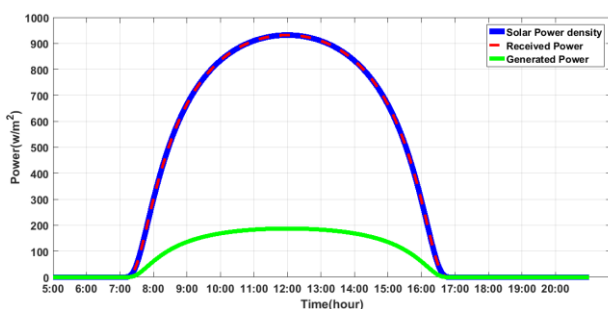
شکل (۷): توان پرتوهای خورشیدی، توان رسیده به پنل و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی ثابت برای شهر تهران در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۴.



شکل (۸): توان پرتوهای خورشیدی، توان رسیده به پنل و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی متحرک برای شهر تهران در تاریخ ۱۳۹۸/۰۴/۲۴.



شکل (۹): توان پرتوهای خورشیدی، توان رسیده به پنل و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی ثابت برای شهر تهران در تاریخ ۱۳۹۸/۰۹/۲۴.



شکل (۱۰): توان پرتوهای خورشیدی، توان رسیده به پنل و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی متحرک برای شهر تهران در تاریخ ۱۳۹۸/۰۹/۲۴.

نمودار شکل (۱۱) متوسط توان تولیدشده توسط سیستم‌های فوتوولتائیک ثابت و متحرک در طول سال ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد که به ترتیب تقریباً برابر با 29 KW/m^2 و 29 KW/m^2 است.

شکل (۷) منحنی‌های توان پرتوهای تابشی خورشید، توان رسیده به پنل و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی ثابت را برحسب ساعات مختلف در روز ۱۳۹۸/۰۴/۲۴ نشان می‌دهد. درحالی‌که شکل (۸) منحنی‌های متناظر مربوط به سیستم فوتوولتائیک متحرک را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه می‌گردد در سیستم متحرک، ردیابی خورشید موجب می‌شود پنل خورشیدی تقریباً تمام پرتوهای خورشیدی را دریافت نماید و توان تولیدشده به میزان چشمگیری افزایش یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در این روز تابستانی، متوسط توان پرتوهای خورشیدی $782/7 \text{ W/m}^2$ است که پنل خورشیدی ثابت تنها $471/6 \text{ W/m}^2$ از آن را دریافت می‌کند و توان تولیدی متوسط آن 95 W/m^2 است. درحالی‌که پنل خورشیدی متحرک با دریافت تمام پرتوهای خورشیدی می‌تواند به‌طور متوسط 156 W/m^2 توان تولید کند. شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج مشابهی را برای روز پاییزی ارائه می‌نمایند. در این روز با توجه به کاهش طول زمان روز، متوسط توان پرتوهای خورشیدی $394/4 \text{ W/m}^2$ است که میزان دریافت پنل ثابت $313/78 \text{ W/m}^2$ و متوسط توان تولیدی آن $63/7 \text{ W/m}^2$ است. متوسط توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی متحرک $79/78 \text{ W/m}^2$ است.

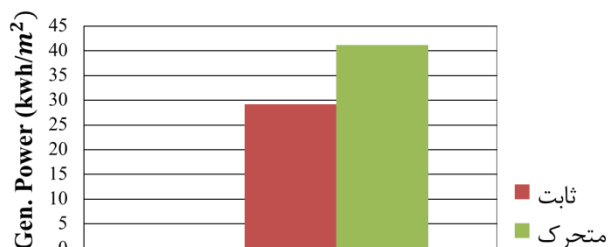
نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد استفاده از سیستم متحرک می‌تواند توان تولیدشده را برای روز تابستانی بیش از ۶۴ درصد و برای روز پاییزی بیش از ۲۵ درصد افزایش دهد.

در مرجع [۱۶] هزینه‌ی مربوط به چندین سیستم ردیاب مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله هزینه‌ی پنل خورشیدی KW ۵ را ۲۵۰۰۰ دلار در نظر گرفته است. بر اساس نتیجه‌ی این مقاله درصد هزینه‌ی هر بخش نسبت به هزینه‌ی کل به شرح جدول (۵) است. با توجه به این جدول هزینه‌ی مربوط به پنل خورشیدی بیشترین سهم را دارد.

اگر هزینه‌ی پنل خورشیدی را ۲۵۰۰۰ دلار در نظر بگیریم، بر اساس جدول (۵) می‌توان هزینه‌ی کل سیستم ثابت و متحرک دومحوره را برآورد نمود و از آنجا هزینه‌ی بخش‌های دیگر را نیز محاسبه کرد. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول (۶) درج شده است. بدین ترتیب هزینه‌ی سیستم متحرک دومحوره در مقایسه با سیستم ثابت ۲۸ درصد بیشتر است. لیکن برای اینکه تحلیل اقتصادی کامل شود لازم است علاوه بر هزینه‌ی ساخت (سؤال اول)، میزان بهره‌ی انرژی حاصل از هر سیستم (سؤال دوم) نیز محاسبه گردد.

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بازدهی سیستم ثابت و متحرک دومحوره به ترتیب ۱۴/۱۶ درصد و ۲۰/۰۲ درصد محاسبه گردید که ۴۱/۴ درصد بهبود در بازدهی را نشان می‌دهد. این میزان بهبود در بازدهی در ازای پرداخت ۲۸ درصد هزینه‌ی بیشتر حاصل می‌شود. به بیان دیگر نسبت هزینه به بازدهی در سیستم ثابت و متحرک به ترتیب برابر با ۱۹۵۹ و ۱۷۸۵ دلار به ازای یک درصد بهره است. این مطلب نمایانگر این است که سیستم فوتوولتائیک با ردیابی هوشمند نه تنها بازدهی را افزایش می‌دهد بلکه از دیدگاه اقتصادی نیز نسبت به سیستم ثابت برتری دارد.

۴۱ است. به این ترتیب با استفاده از ردیاب دومحوره توان تولیدی ۴۱/۴ درصد بهبود می‌یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در دوره‌ی یک‌ساله، بازدهی سیستم ثابت ۱۴/۱۶ درصد و سیستم متحرک با ردیاب دومحوره ۲۰/۰۲ درصد است. بنابراین با استفاده از ردیابی هوشمند می‌توان بازدهی سیستم را حدود ۶ درصد افزایش داد که معادل ۴۱/۴ درصد بهبود است.



شکل (۱۱): متوسط توان تولیدی سیستم‌های ثابت و متحرک برای تهران در سال ۱۳۹۸.

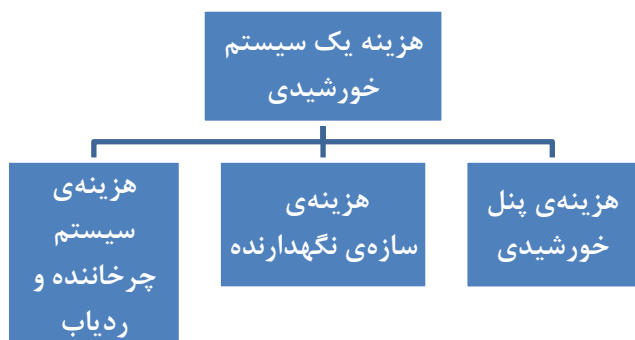
۴- تحلیل و بررسی صرفه‌ی اقتصادی

در این بخش سیستم ردیابی هوشمند را با رویکرد اقتصادی بررسی می‌نماییم. رویکرد اقتصادی مسئله را با طرح دو سؤال اساسی تشریح می‌نماید:

۱- هزینه‌ی ساخت ردیاب برای تولید انرژی مشخص چه میزان تخمین زده می‌شود؟

۲- میزان بهره‌ی انرژی حاصل از به‌کارگیری سیستم ردیابی در مقایسه با هزینه‌ی ساخت آن چگونه است؟ به عبارت دیگر آیا اجرای طرح ردیابی مقرون به صرفه است؟

برای پاسخ به این سؤالات هزینه کل سیستم ردیاب خورشیدی را مطابق شکل (۱۲) به سه دسته تقسیم می‌کنیم. دسته‌ی اول مربوط به خرید پنل خورشیدی است که سهم عمده‌ای از هزینه کل را در برمی‌گیرد. با فرض یکسان بودن پنل خورشیدی در همه‌ی سیستم‌های فوتوولتائیک مورد بررسی، هزینه‌ی مربوط به آن برای هر دو سیستم ثابت و متحرک یکسان خواهد بود. دسته‌ی دوم از هزینه‌ها مربوط به خرید سازه‌ی نگهدارنده برای نصب و نگهداری پنل‌های خورشیدی و سایر قطعات مورد نیاز است. هزینه‌ی این دسته با توجه به نوع سازه‌ی نگهدارنده متفاوت است. ولی با بررسی طرح‌های مختلف می‌توان هزینه‌ی مربوط به یک سازه‌ی نگهدارنده محکم و مناسب را استخراج کرد. دسته‌ی سوم هزینه‌ی مربوط به سیستم چرخاننده‌ی پنل خورشیدی است که شامل موتور و گیربکس و همچنین قطعاتی نظیر سنسور، سیستم کنترل و راه‌انداز موتورها می‌شود.



شکل (۱۲): هزینه‌های مختلف در سیستم ردیاب خورشیدی.

سیستم ثابت و متحرک استخراج گردید. نتایج حاصل نشان داد سیستم متحرک تمام پرتوهای خورشیدی را دریافت می‌کند و در مقایسه با سیستم ثابت توان تولیدشده در آن برای روز تابستانی بیش از ۶۴ درصد و برای روز پاییزی بیش از ۲۵ درصد افزایش می‌یابد.

متوسط توان تولیدشده در طول سال ۱۳۹۸ توسط سیستم‌های فوتولتائیک ثابت و متحرک به ترتیب تقریباً برابر با 29 KW/m^2 و 41 KW/m^2 محاسبه گردید. همچنین بازدهی سیستم ثابت ۱۴/۱۶ درصد و سیستم متحرک با ردیاب دومحوره ۲۰/۰۲ درصد حاصل شد. بنابراین نشان داده شد با استفاده از ردیابی هوشمند توان تولیدشده و در نتیجه بهره‌ی انرژی ۴۱/۴ درصد بهبود می‌یابد.

نتایج تحلیل اقتصادی و محاسبه‌ی هزینه‌ی هر دو سیستم نشان داد هزینه‌ی سیستم متحرک ۲۸ درصد بیشتر از سیستم ثابت است. با پرداخت این هزینه توان تولیدی (بازدهی) ۴۱/۴ درصد افزایش می‌یابد. نسبت هزینه به بازدهی در سیستم ثابت ۱۹۵۹ و در سیستم متحرک دومحوره ۱۷۸۵ دلار به ازای یک درصد بهره است. به این ترتیب نشان داده شد استفاده از سیستم ردیاب دومحوره‌ی هوشمند علاوه بر افزایش بازدهی، هزینه‌ی تولید را نیز کاهش می‌دهد.

مراجع

- [1] Fathi, S. and Mirabdollah Lavasani, A., "A review of renewable and sustainable energy potential and assessment of solar projects in Iran", Journal of Clean Energy Technologies, vol. 5, no. 2, March 2017.
- [2] Bahrami, A., Mohammadnejad, S. and Abkenar, N. J., "Optimized structure of AlGaAs/GaAs double junction solar cells", Journal of Modern Optics, vol. 61, no. 7, pp. 568-575, 2014.
- [3] Nayak, P.P., Dutta, J.P. and Mishra, G.P., "Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer", Eng. Sci. Technol., Int. J., vol. 18, no. 3, pp. 325-335, 2015.
- [4] Prinsloo, G. J., Automatic positioner and control system for a motorized parabolic solar reflector, M.S. thesis, University of Stellenbosch, South Africa, Dec 2014.
- [5] Lee, C. Y., Chou, P. C., Chiang, C. M. and Lin, C. F., "Sun Tracking Systems: A Review", sensors, 2009.
- [6] Wu, C. S. et al., "Study on automatic sun-tracking technology in PV generation", IEEE Third International Conference on Electric Utility

جدول (۵): درصد هزینه‌ی هر بخش از سیستم فوتولتائیک به هزینه‌ی کل [۱۶].

نوع سیستم فوتولتائیک	ثابت	متحرک دومحوره
نسبت هزینه‌ی سازه‌ی نگهدارنده به هزینه‌ی کل (%)	۵ تا ۱۰	۲۵ تا ۳۰
نسبت هزینه‌ی پنل خورشیدی به هزینه‌ی کل (%)	۹۰ تا ۹۵	۷۰ تا ۷۵
نسبت هزینه‌ی سیستم چرخاننده به هزینه‌ی کل (%)	صفر	۲ تا ۳

جدول (۶): هزینه‌ی کل و هزینه‌ی بخش‌های مختلف سیستم فوتولتائیک بر حسب دلار.

نوع سیستم فوتولتائیک	ثابت	متحرک دومحوره
هزینه‌ی سازه‌ی نگهدارنده	حدود ۲۰۸۳	حدود ۹۵۸۳
هزینه‌ی پنل خورشیدی	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰۰
هزینه‌ی سیستم چرخاننده	صفر	حدود ۸۳۳
هزینه‌ی کل	تا ۲۶۲۵۰ ۲۷۷۵۰	تا ۳۳۳۳۳ ۳۵۷۵۰

۵- نتیجه

در این مقاله سیستم‌های فوتولتائیک ثابت و ردیاب دومحوره شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه گردید. سیستم ردیابی بدون نیاز به سنسور و بر اساس الگوریتم هوشمند تولید مسیر حرکتی خورشید، عمل ردیابی را توسط دو موتور جریان ثابت جارو بک دار در دو محور سمت و ارتفاع انجام می‌داد. شبیه‌سازی برای شهر تهران در دو روز تابستانی و پاییزی انجام شد. ابتدا واحد کنترل ردیاب و موتور جریان ثابت شبیه‌سازی و بررسی گردید. شبیه‌سازی ردیابی در بازه‌های زمانی مختلف نشان داد با کاهش بازه‌ی زمانی راندمان حاصل از ردیابی افزایش می‌یابد. بر این اساس و با در نظر گرفتن هزینه‌ی انکودر موردنیاز بازه‌ی زمانی ۱ دقیقه‌ای برای ردیابی انتخاب شد.

منحنی‌های توان پرتوهای خورشیدی، توان رسیده به پنل خورشیدی و توان تولیدشده توسط پنل خورشیدی در هر دو

- photovoltaic blinds considering the photovoltaic panel type and the solar tracking method*", Energy and Buildings, vol. 193, pp. 1-14, June 2019.
- [12] Zhu, Z. et al., "Performance Analysis on Bifacial PV Panels With Inclined and Horizontal East–West Sun Trackers", IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, pp. 636 - 642, May 2019.
- [13] Allamehzadeh, H., "An Update on Solar Energy and Sun Tracker Technology with a Dual Axis Sun Tracker Application", IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, IL, USA, 16-21 June 2019.
- [14] <http://www.sei-automation.com/>
- [15] <https://www.micromo.com/technical-library/dc-motor-tutorials/motor-calculations/>
- [16] Almeida, P. and Silva, P., "Practical advantages of the use of tracking systems in power applications of photovoltaic solar panels", Proceedings of the International Congress of Energy and Environment Engineering and Management, Portalegre, Portugal, 18–20 May 2005.
- Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 6-9 April 2008.
- [7] Yuan, X. and Wencheng, G., "The design of ARM-based automatic sun tracking system", International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2010.
- [8] Tanvir Arafat Khan, Md. et al., "Design and Construction of an Automatic Solar Tracking System", 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2010, Dhaka, Bangladesh, 18-20 December 2010.
- [9] Hung, T. H., Yau, H. T. and Chen, J. H., "Design and implementation of FPGA-based Taguchi-chaos-PSO sun tracking systems", Mechatronics Journal, vol. 25, pp. 55-64, February 2015.
- [10] Kang, H., Hong, T. and Lee, M., "Technical performance analysis of the smart solar photovoltaic blinds based on the solar tracking methods considering the climate factors", Energy and Buildings, vol. 190, pp. 34-481, May 2019.
- [11] Kang, H., Hong, T., Jung, S. and Lee, M., "Techno-economic performance analysis of the smart solar