

## تأمین انرژی روشنائی کشتی با استفاده از سلول خورشیدی همراه با ردیاب هوشمند مبتنی بر کنترل فازی

حمید ملکی زاده<sup>۱</sup>، مجید آقابابائی<sup>۲</sup>

H.malekizadeh@yahoo.com

۱. استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، نوشهر، ایران

۲. استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، نوشهر، ایران

### چکیده

انرژی خورشیدی به عنوان منبع جایگزین انرژی در کل جهان پذیرفته شده است. در این مقاله با استفاده از سلول‌های خورشیدی و سیستم ردیاب هوشمند خورشیدی دو محوره طراحی و ساخته شده، انرژی مورد نیاز برای سیستم روشنائی کشتی تأمین می‌شود. در طراحی سیستم با توجه به شدت و جهت وزش بادهای سنگین، سیستم کنترلی بین دریافت حداکثر انرژی از خورشید و آسیب ندیدن بخش مکانیکی و ماژول‌های خورشیدی مصالحه‌ای انجام داده و در صورتیکه شدت وزش باد از حد تحمل سلول‌های خورشیدی بیشتر باشد، دریافت انرژی را فدای آسیب ندیدن سیستم و سلامت آن می‌کند. برای سیستم کنترلی از الگوریتم کنترل فازی و برای به حرکت در آوردن سلول‌های خورشیدی از یک موتور DC و یک موتور پله‌ای استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با عملکرد صحیح سیستم کنترلی خطای عملکرد بخصوص در ساعات بعدازظهر و ابتدای روز، نسبت به حالت بدون کنترل و با استفاده از کنترلر PID کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی:** انرژی خورشیدی، ردیاب دو محوره، کنترل فازی، موتور پله‌ای.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۰۸

## ۱- مقدمه

در حال حاضر تقاضای جهانی انرژی، به همراه مشکلات ناشی از پایان پذیری سوخت‌های فسیلی و اثرات زیانبار زیست محیطی استفاده از این نوع سوخت‌ها، به سطح بحرانی رسیده است و مجامع علمی را به فکر استفاده از منابع انرژی جایگزین واداشته است [۱]. انرژی خورشیدی بعنوان یکی از منابع پاک، پایان ناپذیر، تجدیدپذیر و البته رایگان، امروزه به طرق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های انرژی فتوولتائیک یکی از گسترده‌ترین تاسیسات تولید توزیع شده هستند [۲]. یکی از کاربردهای مهم انرژی خورشیدی، تبدیل آن به انرژی الکتریکی به کمک سیستم‌های حرارتی و سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. در سیستم فتوولتایی انرژی خورشیدی به صورت مستقیم و بدون نیاز به مکانیزم‌های متحرک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۳].

باتوجه به شرایط آب و هوایی ایران، انرژی خورشیدی یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شود که می‌تواند به خوبی در ایران گسترش پیدا کند و جایگزین منابع فعلی انرژی گردد. میزان تابش نور خورشید در کشور ایران حدود ۵ کیلو وات ساعت انرژی در روز در مترمربع است و بیش از ۹۰ درصد خاک ایران در سال ۳۰۰ روز در معرض تابش نور خورشید قرار دارد، که از این نظر جزو کشورهای بسیار غنی محسوب شده و پتانسیل خوبی برای استفاده از سیستم‌های فتوولتایی برای تولید برق را فراهم نموده است [۴]. یکی از کاربردهای برق فتوولتایی، بهره‌گیری از آن برای تأمین انرژی روشنایی در کشتی‌ها است. با توجه به اینکه انرژی دریافتی از خورشید توسط ماژول‌های فتوولتایی با زاویه تابش اشعه خورشید بر روی آن نسبت مستقیم دارد، از این رو عمود بودن ماژول‌های فتوولتائیک به اشعه‌های خورشید در طول زمان حرکت کشتی تأثیر بسزایی بر راندمان تولید انرژی الکتریکی خواهد داشت. در صورت استفاده از سیستم‌های هوشمند ردیاب خورشیدی مقدار انرژی جذب شده بسیار بالاتر از سیستم ثابت خواهد بود. راندمان یک سیستم ردیاب دو محوره تا ۶۶٫۸۸٪ افزایش می‌یابد [۵]. مطالعات نظری و کاربردی زیادی روی سیستم‌های خورشیدی صورت گرفته، که هر یک از زوایای مختلفی به این مهم پرداخته‌اند. مرجع [۱] برای شناسایی سیستم‌های خورشیدی و پیش بینی نقطه ماکزیمم توان

از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی استفاده کرده است. مرجع [۲] از استراتژی‌های کنترل ولتاژ و جریان برای این سیستم‌ها استفاده کرده است. یک مطالعه فرهنگی و اجتماعی در مورد سیستم‌های خورشیدی در هند توسط مرجع [۳] صورت گرفته و دسته بندی‌هایی از این جهت انجام داده است. از نظر اقتصادی نیز برای رسیدن به مقادیر توان بهینه از طریق تنظیم زاویه پنل‌های خورشیدی مطالعه ای توسط مرجع [۴] صورت گرفته است. مرجع [۵] به ساخت و مطالعه تجربی در مورد ردیاب‌های خورشیدی پرداخته است. همچنین از کنترل کننده‌های زیادی می‌توان بدین منظور استفاده کرد مانند کنترل کننده PID که در مرجع [۶] بکار رفته است و ضرایب کنترل کننده با استفاده از روشی بهینه بدست آمده‌اند اما با توجه به اینکه این سیستم بر روی کشتی نصب خواهد شد و کشتی می‌تواند در هر جهت جغرافیایی حرکت کند، سیستم باید به نحوی طراحی گردد که سلول‌های خورشیدی همواره به سمت خورشید قرار بگیرند. بنابراین استفاده از سیستم‌های هوشمند ردیاب خورشیدی ضروری به نظر می‌رسد. در سیستم طراحی شده، علاوه بر سیستم هوشمند ردیاب خورشیدی، از سنسورهایی برای تشخیص جهت و شدت وزش باد نیز استفاده شده است تا در شرایط خاصی مانند بادهای شدید، سالم ماندن تجهیزات نسبت به دریافت حداکثر انرژی در اولویت قرار گیرد. در این مقاله سیستم تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز برای روشنایی کشتی با استفاده از ردیاب هوشمند و بر مبنای کنترل فازی با در نظر گرفتن جهت و شدت وزش باد تشریح شده است.

ساختار مقاله در ادامه بدین صورت است که در بخش دوم محاسبات مصرف انرژی انجام شده است و در بخش سوم سیستم کنترل همراه با منطق فازی بیان گردیده‌است و در بخش چهارم شبیه‌سازی در حالت‌های بدون استفاده از سیستم کنترلی، با کنترلر PID و با استفاده از منطق فازی انجام شده و به بحث و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته شده‌است. سرانجام در بخش پنجم نتایج حاصل از این مقاله به صورت خلاصه بیان گردیده است.

## ۲- محاسبات مصرف انرژی

در سیستم برق کشتی هم برق AC و هم برق DC وجود دارد. از آنجاییکه سیستم روشنایی کشتی‌ها از برق AC

توان الکتریکی مورد نیاز برای سیستم روشنایی یک کشتی نوعی حدود یک کیلو وات در نظر گرفته شده است. در این طراحی از پنج ماژول ۲۰۰ واتی استفاده شده است. همچنین می توان مقدار انرژی خورشیدی را با توجه به موقعیت جغرافیایی، مساحت سلول های خورشیدی استفاده شده و راندمان ماژول های خورشیدی محاسبه کرد [۷]. در این مقاله با استفاده از اطلاعات شدت تابش خورشید شهر نوشهر محاسبات صورت گرفته است. مقدار متوسط انرژی خورشیدی در کل فصول در این شهر حدود ۴,۴ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روز می باشد. سلول های خورشیدی فتوولتاییک حدود ۲۰٪ از انرژی دریافتی از خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. با توجه به مساحت سلول های خورشیدی مورد استفاده که هر کدام حدود ۱,۶۵ متر مربع می باشد (1m x 1.65m) مطابق معادله (۱) ماژول های خورشیدی حدود ۷,۲۶ کیلو وات ساعت در روز انرژی تولید می کنند. برای طراحی سیستم خورشیدی از نرم افزارهای Sunny Design و PVSOL استفاده شده است.

$$4.4 \text{ kwh} / \text{m}^2 \text{ day} \times 0.2 \times 8.25 \text{m}^2 = 7.26 \text{ kwh} / \text{day} \quad (1)$$

با توجه به اینکه عمده مصرف انرژی تولیدی در شب می باشد، انرژی تولیدی باید در بانک باتری ذخیره شده و سپس به کمک اینورتر آن را به فرم مناسب برای تغذیه سیستم روشنایی تبدیل کرد. برای بانک باتری از دو عدد باتری ۱۲ ولت ۶۵ آمپر استفاده شده است.

### ۳- سیستم کنترلی و منطق فازی

بخش الکترونیکی و کنترلی شامل اجزای اصلی زیر می باشد که وظایف هر جزء به طور جداگانه تشریح خواهد شد.

- سنسورهای مقاومتی نوری (فتورزیستور)

- سنسورهای جهت و شدت وزش باد

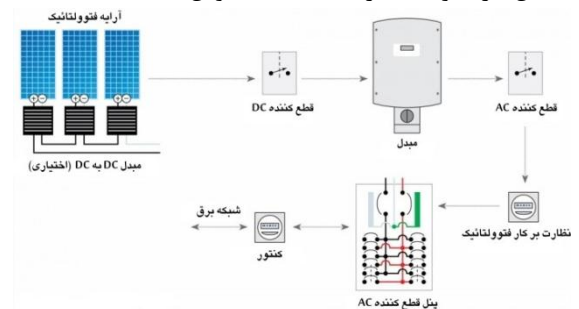
- میکروکنترلر و درایور موتورها

- الگوریتم کنترلی

### ۳-۱- سنسور مقاومتی نوری

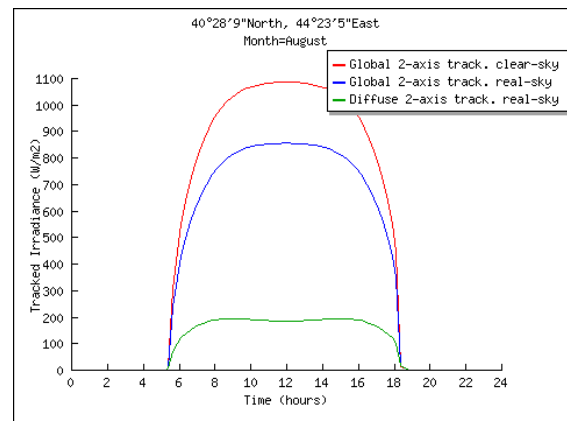
با استفاده از سنسورهای مقاومتی نوری و به کمک یک ایده ساده، می توان با تشخیص زاویه تابش اشعه های خورشید همواره ماژول های خورشیدی را طوری حرکت داد که اشعه ها به صورت عمود بر صفحه فتوولتاییک بتابند. مدار طراحی شده برای این بخش شامل چهار

تکفاز استفاده می کند، باید خروجی سیستم طراحی شده به فرم AC تبدیل گردد تا بتواند انرژی لازم برای سیستم روشنایی را تأمین کند. همانطور که می دانید سلول های فتوولتاییک، انرژی خورشید را جذب کرده و به صورت ولتاژ DC با دامنه پایین تحویل می دهند. بنابراین ولتاژ خروجی سلول های فتوولتاییک به طور مستقیم برای استفاده مصرف کننده های AC مناسب نبوده و برای اینکه بتوان انرژی این سلول ها را توسط اینگونه مصرف کننده مورد استفاده قرار داد نیاز به مبدل های ولتاژ مناسب می باشد. شکل (۱) شماتیک سیستم تبدیل انرژی را نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می کنید، خروجی ماژول های خورشیدی به کمک شارژ کنترلر باتری ها را شارژ می کند. از این باتری ها می توان مستقیماً برای تغذیه بارهای DC استفاده کرد. به کمک مبدل های ولتاژ، توان ذخیره شده در باتری ها را می توان به فرم AC تبدیل کرده و به مصرف کننده ها تحویل داد.



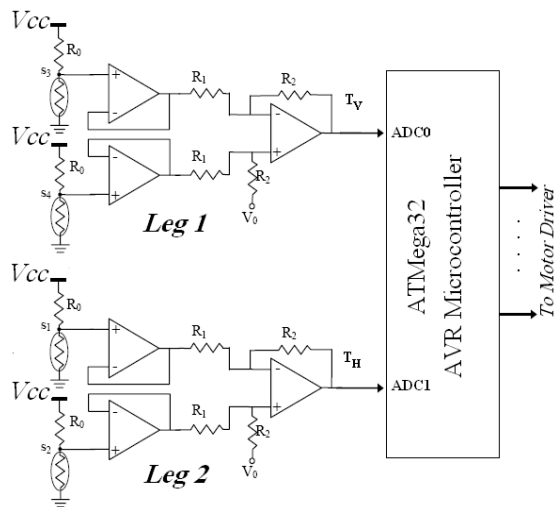
شکل (۱) سیستم تبدیل انرژی فتوولتاییک

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می کنید، با استفاده از سیستم ردیاب دو محوره، در روزهای صاف در اکثر ساعات حدود ۱۰۵۰ وات بر متر مربع و در روزهای عادی حدود ۸۵۰ وات بر متر مربع توان تابشی در شهر نوشهر وجود دارد.



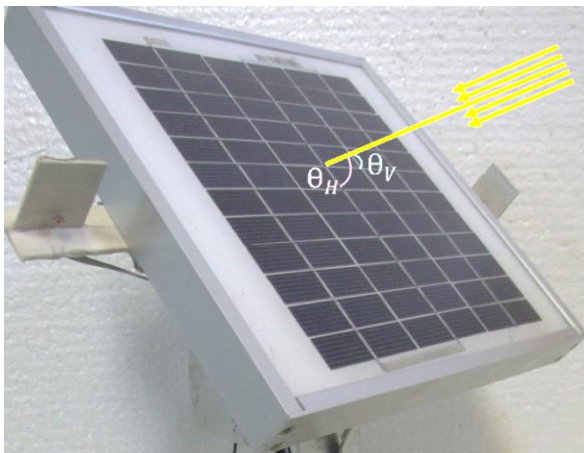
شکل (۲) موقعیت فیزیکی سنسورهای مقاومتی نوری

حرکت داده شود و در صورتیکه  $T_V$  کوچکتر از  $V_0$  باشد سلول خورشیدی باید در جهت شمال به جنوب حرکت داده شود. در صورتیکه  $T_V = V_0$  باشد اشعه‌های خورشید عمود بر سلول خورشیدی خواهند بود ( $\theta_V$  برابر  $90^\circ$  درجه است). به طور مشابه در صورتیکه  $T_H$  بزرگتر از  $V_0$  بوده و زاویه اشعه‌های خورشید با ماژول فتوولتاییک ( $\theta_H$ ) کمتر از  $90^\circ$  درجه باشد، سلول خورشیدی باید در جهت شرق به غرب حرکت داده شود و در صورتیکه  $T_H$  کوچکتر از  $V_0$  باشد سلول خورشیدی باید در جهت غرب به شرق حرکت داده شود.



شکل (۴) مدار شماتیک سنسورهای مقاومتی نوری

شکل (۵) و  $\theta_H$  را نشان می‌دهد. موقعیت مطلوب برای عمود بودن سلول خورشیدی به اشعه‌های خورشید زمانی است که  $\theta_V$  و  $\theta_H$  برابر  $90^\circ$  درجه باشند.



شکل (۵) زوایای اشعه‌های خورشید با سلول خورشیدی ( $\theta_V$ ) و ( $\theta_H$ )

### ۲-۳- سنسورهای شدت و جهت وزش باد

این سنسورها برای اندازه‌گیری شدت و جهت وزش باد بکار گرفته شده‌اند. در برخی موارد سلول‌های خورشیدی

سنسور مقاومتی نوری است که بر روی ماژول خورشیدی جایگذاری شده‌اند. هر جفت از این سنسورها با استفاده از یک صفحه جداکننده مات از یکدیگر جدا شده و نسبت به جفت سنسور بعدی دارای اختلاف فاز فیزیکی  $90^\circ$  درجه می‌باشند. به عبارت دیگر صفحه‌های جداکننده هر جفت سنسور مطابق شکل (۳) بر یکدیگر عمود می‌باشند.



شکل (۳) موقعیت فیزیکی سنسورهای مقاومتی نوری

هر بخش از سنسورها شامل دو مقاومت نوری است. جفت سنسور مقاومتی نوری اول برای تشخیص زاویه افقی اشعه‌های خورشید و جفت سنسور مقاومتی نوری دوم برای تشخیص زاویه عمودی اشعه‌های خورشید به کار می‌روند. برای حرکت دادن ماژول فتوولتاییک و قرار دادن آن در راستای عمود بر اشعه‌های خورشید از یک موتور پله‌ای و یک موتور DC استفاده شده است. با استفاده از یک مدار تقویت کننده دیفرانسیلی خروجی هر یک از جفت سنسورهای مقاومتی نوری برای پردازش به واحد میکروکنترلر ارسال می‌شود. خروجی‌های  $T_V$  و  $T_H$  به ترتیب خطای عمودی و افقی بوده و به عنوان متغیرهای فازی ورودی برای تولید سیگنال‌های کنترلی سرعت و جهت حرکت موتورها استفاده می‌شوند. معادله (۲) روابط  $T_V$  و  $T_H$  و شکل (۴) مدار مربوطه را نشان می‌دهد.

$$T_V = \frac{R_2}{R_1}(V_{s4} - V_{s3}) + V_0 \quad (2)$$

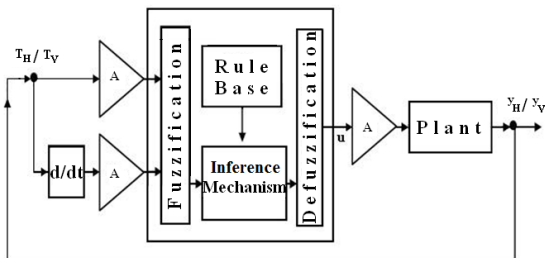
$$T_H = \frac{R_2}{R_1}(V_{s2} - V_{s1}) + V_0$$

که در آن  $R_1$  و  $R_2$  مقاومت‌های مدار تقویت کننده دیفرانسیلی،  $V_{s_i}$  ( $i=1,2,3,4$ ) ها ولتاژ خروجی سنسورهای مقاومتی نوری و  $V_0$  ولتاژ آفست DC می‌باشند.

در صورتیکه  $T_V$  بزرگتر از  $V_0$  بوده و زاویه اشعه‌های خورشید با ماژول فتوولتاییک ( $\theta_V$ ) کمتر از  $90^\circ$  درجه باشد، سلول خورشیدی باید در جهت جنوب به شمال

قرار گیرد را دارد. در واقع فازی ساز واسطی بین محیط و موتور استنتاج فازی است.

نافازی ساز: وظیفه تبدیل نتایج موتور جستجو به ورودی-های واقعی پردازش را دارد. در واقع نافازی ساز واسطی بین موتور استنتاج فازی و محیط است



شکل (۶) ساختار کنترل کننده فازی

روش طراحی مشابه حالت کلی کنترل کننده‌های فازی است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، در ساختار کنترل کننده پیشنهادی به منظور ساده‌سازی، به جای استفاده از فازی ساز و نافازی ساز از تابع عضویت استفاده شده است. در این شکل  $T_H/T_V$  و  $dT_H/dT_V$  به ترتیب معرف خطا و تغییرات خطا می‌باشد. مقدار خروجی کنترل مطابق معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$y_H = rule(i, j) - \frac{(\Delta T_H + \Delta dT_H)}{2}$$

$$y_V = rule(i, j) - \frac{(\Delta T_V + \Delta dT_V)}{2}$$

که در آن:

$i$  تعداد مجموعه قطعی است که به متغیرهای خطای  $T_H/T_V$  تعلق دارد.

$j$  تعداد مجموعه قطعی است که به متغیرهای خطای  $dT_H/dT_V$  تعلق دارد.

$\Delta T_H/\Delta T_V$  اختلاف بین مقادیر خطای  $T_H/T_V$  مرکز تابع عضویت می‌باشد.

$$\Delta T_H = T(i) - T_H$$

$$\Delta T_V = T(i) - T_V$$

$T(i)$  مرکز مجموعه  $i$  به ترتیب برای  $T_H$  و  $T_V$  است.

$\Delta dT_H/\Delta dT_V$  اختلاف بین تغییرات خطا و مرکز تابع عضویت است.

برای دریافت حداکثر انرژی خورشید بایستی در راستای عمود بر جهت وزش باد قرار گیرند. در چنین شرایطی با توجه به شدت وزش باد، ممکن است نیروی زیادی بر روی بخش‌های مکانیکی سیستم و همچنین بر روی سلول خورشیدی وارد شود. در این شرایط سیستم کنترلی باید مصالحه‌ای بین آسیب ندیدن سیستم و دریافت حداکثری انرژی انجام دهد. بدین صورت که اگر شدت وزش باد از مقدار نیروی قابل تحمل بخش مکانیکی سیستم تجاوز کند، بخش کنترلی سلول‌های خورشیدی را در راستای جهت وزش باد قرار داده و پس از فروکش کردن باد دوباره سلول‌های خورشیدی را در راستای دریافت حداکثر انرژی قرار می‌دهد.

### ۳-۳- میکروکنترلر و درایور موتورها

این بخش با استفاده از یک میکروکنترلر AVR راندمان بالا و کم مصرف ۸ بیتی با معماری RISC طراحی شده است. این میکروکنترلر دارای یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۰ بیتی ۸ کاناله داخلی می‌باشد. خروجی سنسورهای مقاومتی نوری پس از عبور از یک طبقه تقویت کننده به ورودی ADC0 و ADC1 میکروکنترلر مطابق شکل ۴ داده می‌شوند. میکروکنترلر مقادیر آنالوگ سنسورها را توسط ADC داخلی خود خوانده و مقدار آن‌ها را با مقدار  $V_0$  مقایسه کرده و دستورات لازم را برای ردیابی خورشید به درایور موتورها ارسال می‌کند. برای حرکت دادن سلول خورشیدی در راستای عمودی و افقی، از یک موتور DC و یک موتور پله‌ای استفاده شده است.

### ۳-۴- الگوریتم کنترلی

بلوک دیاگرام سیستم کنترل فازی در شکل ۶ نشان داده شده است. یک کنترل کننده فازی دارای ۴ بخش می‌باشد [۸-۱۱]:

پایگاه قواعد: این پایگاه مجموعه‌ای از اگر-آنگاه‌هاست که توسط متخصصین برای دسترسی به یک فرایند کنترلی خوب تعیین می‌شوند.

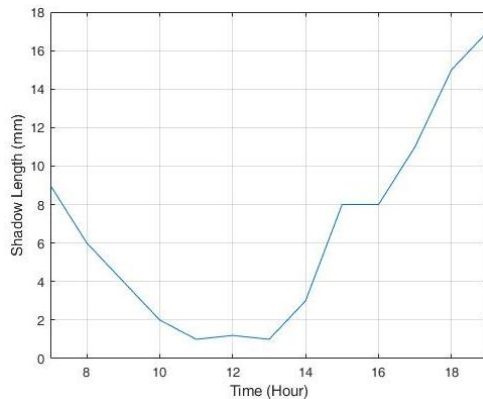
موتور استنتاج: در یک موتور استنتاج فازی اصول منطق فازی برای ترکیب قواعد اگر-آنگاه در پایگاه قواعد فازی به یک مجموعه نگاشت فازی تبدیل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فازی ساز: وظیفه تبدیل ورودی‌های کنترل کننده به اطلاعاتی که به راحتی توسط موتور استنتاج مورد استفاده

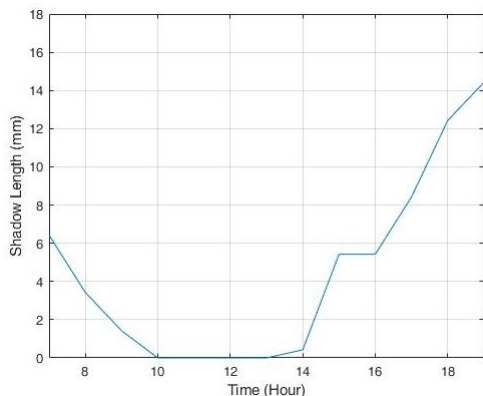
به منظور تحلیل و بررسی صحت عملکرد سیستم طراحی و ساخته شده مطابق شکل (۸)، یک شاخص به طول ۱۰ سانتیمتر بر روی سلول خورشیدی نصب شده است. در صورتیکه سیستم کنترل به درستی عمل کند، سلول خورشیدی به اشعه‌های خورشید عمود بوده و در نتیجه شاخص نصب شده هیچ سایه‌ای نباید داشته باشد. طول سایه شاخص با خطای عملکرد سیستم کنترلی نسبت مستقیم دارد. شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ طول سایه شاخص در یک روز از ماه خرداد با نرخ نمونه‌برداری یک نمونه بر ساعت را در حالت‌های بدون کنترل، با استفاده از کنترلر PID و همچنین با استفاده از منطق فازی نشان می‌دهند.



شکل (۸) سیستم طراحی و ساخته شده



شکل (۹) طول سایه شاخص در یک روز از خرداد ماه بدون استفاده از کنترلر



شکل (۱۰) طول سایه شاخص در یک روز از خرداد ماه با استفاده از کنترلر PID

(۵)

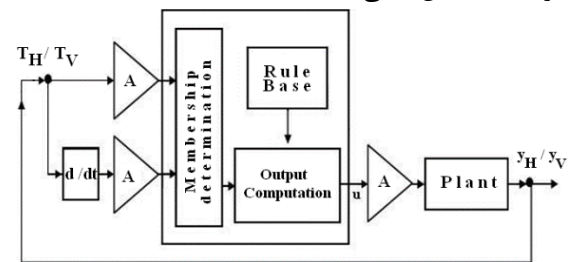
$$\Delta T_H = T(j) - dT_H$$

$$\Delta T_V = T(j) - dT_V$$

$T(j)$  تعداد مجموعه قطعی است که به تغییرات متغیرهای خطای  $dT_H / dT_V$  تعلق دارد.

$\text{Rule}(i, j)$  مقدار  $(i, j)$  امین خانه پایگاه قواعد می‌باشد.

همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده، کنترل‌کننده دارای سه بخش اصلی است.



شکل (۷) ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی

بخش تعیین تابع عضویت اندیس‌های  $i$  و  $j$  که به مجموعه‌های خطا و تغییرات خطا تعلق دارند را آماده می‌کند. به جای بخش نافازی‌ساز و موتور جستجو در کنترل‌کننده فازی، بخش محاسبه خروجی با عملیات ریاضی ساده خروجی واقعی کنترل‌کننده را محاسبه می‌کند. مراحل زیر فرآیند محاسبه خروجی را نشان می‌دهد.

**گام ۱:** محاسبه  $\Delta T_H / \Delta T_V$ ، اختلاف بین مرکز  $i$  امین مجموعه و مقدار خطا.

**گام ۲:** محاسبه  $\Delta dT_H / \Delta dT_V$ ، اختلاف بین مرکز  $j$  امین مجموعه و مقدار تغییرات خطا.

**گام ۳:** استخراج محتویات  $(i, j)$  امین خانه پایگاه قواعد برای تعیین خروجی.

**گام ۴:** تنظیم مقدار خروجی با تفریق میانگین  $\Delta T_H / \Delta T_V$  و  $\Delta dT_H / \Delta dT_V$ .

در نتیجه این مراحل، خروجی یک مقدار واقعی بوده و نیازی به نافازی‌سازی ندارد. این روش کلیه مراحل پیچیده کنترل فازی را ساده کرده و زمان محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین زمان مورد نیاز برای تصمیم‌گیری بسیار کوتاه شده و پیاده‌سازی برای کاربردهای بلادرنگ نسبت به کنترل‌کننده‌های فازی، بدون نیاز به سخت‌افزار خاصی ساده‌تر می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در دریا، سعی شد بین دریافت حداکثر انرژی از خورشید و آسیب ندیدن بخش مکانیکی و ماژول‌های خورشیدی مصالح‌های انجام شود تا در صورتیکه شدت وزش باد از حد تحمل سلول‌های خورشیدی بیشتر باشد، دریافت انرژی را فدای آسیب ندیدن سیستم و سالم ماندن آن کند. بدین منظور یک سیستم کنترلی مبتنی بر الگوریتم کنترل فازی طراحی شد و برای به حرکت در آوردن سلول‌های خورشیدی از یک موتور DC و یک موتور پله‌ای استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با عملکرد صحیح سیستم کنترلی خطای عملکرد بخصوص در ساعات بعدازظهر و ابتدای روز، نسبت به حالت بدون کنترل و با استفاده از کنترلر PID کاهش یافته است.

#### ۶- منابع

[1] Ndiaye, E.H.M.; Ndiaye, A.; Tankari, M.A.; Lefebvre, G., 2018. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Application for The Identification of a Photovoltaic System and The Forecasting of Its Maximum Power point. 7<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Oct. 14-17, 2018. Paris, France.

[2] Yaramasu, V., Rivera, M., Dekka, A., Rodriguez, J., 2019. Predictive Control of Four-Leg Converters for Photovoltaic Energy Systems. Solar Photovoltaic Power Plants. Power Systems. Springer, Singapore. DOI [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6151-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6151-7_3).

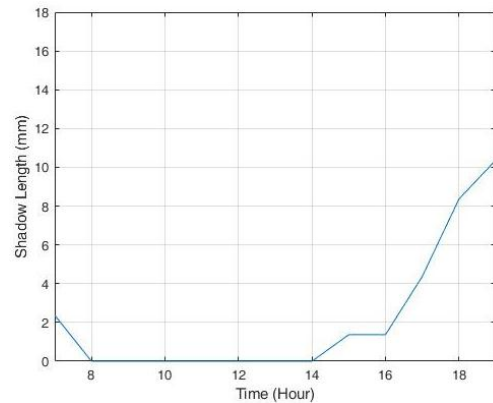
[3] Padmanathan, K., Govindarajan, U., Vigna, Ramachandaramurthy, K., Rajagopalan, A., Pachaiyannan, N., Sowmmiya, U., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J.B., Xavier, S., Periasamy, S.K., 2019. A sociocultural study on solar photovoltaic energy system in india: stratification and policy implication. Journal of Cleaner Production, 216(1): 461-481.

درویشی بلورانی، ع؛ پاک‌طینت، ه؛ و ابراهیمی، آ. ۱۳۹۳. برآورد [۴] ارزش اقتصادی تنظیم زاویه‌ی تیلت پنل‌های خورشیدی بر مقدار بهینه با استفاده از داده‌های سنجش از دور. فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی. سال دهم، شماره ۴۰، صفحات ۹۵-۱۰۹.

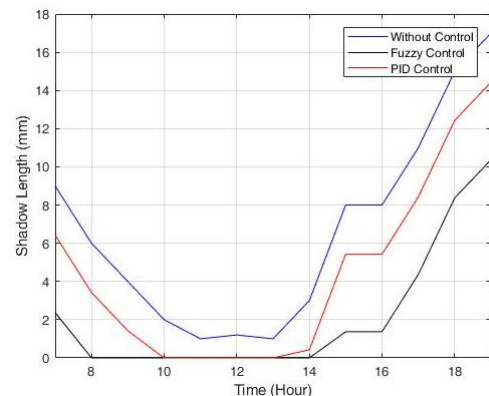
[5] Nayak, H.K., Kumar, M., Prasad, N., Behera, R.R., 2011. Fabrication and Experimental Study on Two-Axis Solar Tracking. International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering. 1(1): 123-126.

[6] Sabir, M.M., and Tariq, A., 2016. Optimal PID controller design through swarm intelligence algorithms for sun tracking system. Applied Mathematics and Computation. 274 (3) 690-699.

[7] Leiner, R., 2007. Research solar power boat-data management and online visualization. IEEE, 26-28 Sept. 2007 Windhoek, South Africa.



شکل (۱۱) طول سایه شاخص در یک روز از خرداد ماه با استفاده از کنترل فازی



شکل (۱۲) طول سایه شاخص در یک روز از خرداد ماه در سه حالت مختلف

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، به دلیل شدت بالای نور خورشید در اواسط روز، سیستم ردیاب در این ساعات دارای حداقل خطا می‌باشد. در ساعات بعدازظهر و ابتدای روز، خطای عملکرد افزایش می‌یابد. این امر به دلیل وجود نورهای پراکنده در محیط که به عنوان نویز سیستم محسوب می‌شوند و همچنین کم بودن شدت نور خورشید در این ساعات می‌باشد. اما تأثیر سیستم کنترل در دو نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نسبت به شکل ۹ واضح است که طول سایه کاهش چشمگیری داشته است ضمن اینکه با استفاده از منطق فازی به دلیل ردیابی هوشمند این امر بیشتر از کنترلر PID کاهش داشته است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف تأمین انرژی مورد نیاز برای سیستم روشنایی کشتی توسط سلول‌های خورشیدی به همراه سیستم ردیاب هوشمند خورشیدی دو محوره، طراحی و ساخته شده می‌باشد. با توجه به شدت و جهت وزش باد

- 
- [8] Saini, J.S., and Singh, Y.P., 1999. Use of Causal Knowledge in Real-Time Fuzzy Logic Controller. *IEEE Transactions on Industry Application*. 35(3): 554–560, May-June 1999.
- [9] Pomares, H., Rojas, I., Gonzalez, J., Damas, M., Pino, B., Prieto, A., 2004. Online Global Learning in Direct Fuzzy Controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 12(2):218–229.
- [10] Begovich, O., Sanchez, E.N., Maldonado, M., 2002. Takagi-Sugeno Fuzzy Scheme for Real-Time Trajectory Tracking of an Underactuated Robot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 10(1): 14–20.
- [11] Antari, J., Iqdour, R., Zeroual, A., 2006. Forecasting the Wind Speed Process using Higher Order Statistics and Fuzzy Systems. *Revue des Energies Renouvelables*, 9(4): 237–251.