

طراحی و شبیه‌سازی سیستم ردياب دو محوره خورشید با استفاده از روابط دقیق زوایای خورشیدی

فائزه اسماعیلی رنجبر^(۱) - حسن فاتحی مرج^(۲) - غضنفر شاهقلیان^(۳)

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده فنی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رفسنجان، کرمان

(۲) استادیار - دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، کرمان

(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۱ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۱

خلاصه: در این تحقیق سیستمی برای ردیابی خورشید طراحی و شبیه‌سازی شده است که براساس روابط دقیق زوایای خورشیدی و بدون استفاده از هیچ سنسور نوری، موقعیت خورشید را شناسایی می‌کند. در واقع روابطی که در این پژوهش استفاده شده بدلیل استفاده از معادله زمان و با کاهش زمان ردیابی از هر یک ساعت به هر ۱۵ دقیقه یک بار از دقت بسیار بیشتری نسبت به موارد مشابه برخوردار است. در این سیستم از یک میکروکنترلر کم مصرف برای تولید فرامین لازم جهت کنترل سیستم و دو موتور پله‌ای برای به حرکت در آوردن آرایه خورشیدی استفاده شده است. با اضافه کردن یک آی‌سی ساعت زمان واقعی (RTC) به مدار، تشخیص زاویه صفحه‌ی متحرک بهتر شده است.

کلمات کلیدی: ردیابی دو محوره خورشید، زوایای خورشیدی، میکروکنترلر، موتور پله‌ای.

۱- مقدمه

با مصرف بی‌رویه و روز افزون سوخت‌های فسیلی به عنوان منابع محدود انرژی و تأثیر آن بر محیط زیست توجه جهانیان به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر جلب شده است. در طی چند دهه اخیر مصرف سوخت‌های مزبور باعث تولید گازهای گلخانه‌ای و بالأخص افزایش ۳۰ درصدی غلظت اتمسفری دی اکسید کربن، باران‌های اسیدی و پدیده گرم شدن زمین و به وجود آمدن سایر پدیده‌های مضر زیست محیطی شده است. در کشور ما نیز از جمله اهداف دولت تأمین نیازهای انرژی نسل آینده، غلبه کردن بر فقر و افزایش رشد و شکوفایی اقتصادی می‌باشد. پایایی و پویایی رسالت فوق ما را به استفاده مفید و بهینه از کل منابع انرژی مقید می‌سازد. ایران با وجود اینکه یکی از کشورهای نفت خیز جهان به شمار می‌رود ولی به علت داشتن شدت تابش خورشید در اکثر مناطق، اجرای طرح‌های خورشیدی الزامی بوده و امکان استفاده از انرژی خورشید، می‌تواند صرفه‌جویی مهمی در مصرف نفت و گاز را به همراه داشته باشد. در حال حاضر استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر به خصوص صفحات خورشیدی و مولدهای بادی گسترش یافته است. باتری خورشیدی یا سلول‌های خورشیدی

ابزارهای الکترونیکی هستند که با استفاده از پدیده فوتولتائیک^۱، نور یا فوتون را مستقیماً به جریان و ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌کنند. عدم نیاز به نگهداری و تعمیر و همچنین عدم ایجاد آلودگی از مزیت‌های این منابع می‌باشد ولی هزینه نصب آنها بالا می‌باشد [۱]. صفحات خورشیدی از تعدادی سلول خورشیدی که انرژی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، تشکیل شده است. ساختار سلول خورشیدی مشابه دیود است با این تفاوت که در نواحی P و N سلول، جفت الکترون - حفره تولید شده در اثر تابش، توسط میدان الکتریکی ناحیه تپی از یکدیگر جدا شده و با اتصال کوتاه کردن دو سر سلول موجب جاری شدن جریان می‌شود. میزان تولید الکترون - حفره و در نتیجه توان خروجی سلول به تابش عمودی رسیده به سلول بستگی دارد [۲]. یکی از روش‌های افزایش انرژی الکتریکی خروجی در مبدل‌های فوتولتائیک، استفاده از آرایه خورشیدی متحرک می‌باشد. سیستم‌های تعقیب‌کننده را به دو نوع کلی یک محوره (با یک درجه آزادی)^۲ و دو محوره (با دو درجه آزادی) می‌توان تقسیم نمود. نوع تک محوره نیز شامل انواع ۱- ردیاب تک محوره عمودی^۳ (VSAT)، ۲- ردیاب تک محوره افقی^۴ (HSAT)، ۳- ردیاب تک محوره شیبدار^۵ (TSAT)

برخوردار می‌باشد. این مقاله ردیابی خورشید را بر اساس زوایای خورشیدی که از روابط مربوطه به دست آمده و از دقت بیشتری نسبت به مراجع [۱۲ و ۱۳] برخوردار است، انجام می‌دهد.

این پژوهش مطابق روند زیر ادامه یافته است:
در بخش دوم زوایای خورشیدی و روابط بین آنها نشان داده شده و در قسمت سوم به طراحی ردیاب دو محوره خورشید پرداخته شده است. نتایج در بخش چهارم آورده شده است و بخش پنجم، قسمت نتیجه‌گیری می‌باشد.

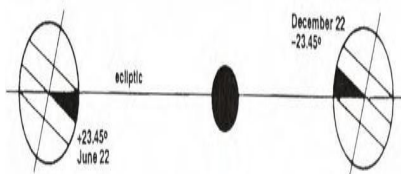
۲- روابط دقیق زوایای خورشیدی

۲-۱- معرفی زوایای خورشیدی

زمین بروی یک مدار بیضی شکل که خورشید در یکی از کانونهای آن است، در حال چرخش است. یک چرخش کامل $365/24$ روز یا دقیق‌تر 365 روز و 5 ساعت و 48 دقیقه و 46 ثانیه طول می‌کشد. مسیر حرکت ظاهری خورشید در آسمان در مدت یکسال را دایره البروج^۷ می‌نامند. استوای سماوی نیز با دایره البروج هم صفحه نیست و زاویه‌ای به اندازه $23/45$ درجه و به نام زاویه میل^۸ یا DEC می‌سازد. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، مقادیر زاویه میل از $23/45$ - درجه در اول زمستان یا انقلاب زمستانی تا صفر درجه در اول بهار و پائیز یا روزهای اعتدالین و $23/45$ + درجه در اول تابستان یا انقلاب تابستانی برای نیمکره شمالی تغییر می‌کند. مقدار زاویه میل به روز که با پارامتر day مشخص شده بستگی دارد و توسط فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۴]:

$$N = 2\pi ((\text{day} - 1) / 365) \quad (1)$$

$$\text{DEC} = ((0.322003 - 22.971 \cos(N) - 0.357898 \cos(2N) - 0.14398 \cos(3N) + 3.94638 \sin(N) + 0.019334 \sin(2N) + 0.05928 \sin(3N)))\pi / 180 \quad (2)$$



شکل (۱): نمایش زاویه میل در انقلاب تابستانی و زمستانی [۱۵]

Fig. (1): Declination angle at the summer and winter solstice [15]

زاویه ساعت (HRA) عبارت است از زاویه بین موقعیت خورشید در زمان مورد نظر و مبدأ اندازه‌گیری آن در ظهر خورشیدی. نصف النهار سماوی نیز دایره بزرگی است روی کره سماوی که از نقطه شمال و جنوب سماوی می‌گذرد و نقطه اوج^۹ روی این دایره قرار دارد. زاویه اوج یا ZEN زاویه بین اشعه خورشید و خط عمود بر صفحه افقی می‌باشد. یکی از راه‌های بیان مختصات اجرام سماوی و همچنین موقعیت ظاهری خورشید در طاق آسمان، استفاده از دو زاویه ارتفاع (ALT) و

می‌باشد [۴ و ۳]. برای افزایش بیشتر توان خروجی می‌بایست از سیستم ردیاب دو محوره استفاده کرد. در نوع دو محوره، صفحه خورشیدی در دو راستای شرق - غرب و بالا- پایین تا جایی حرکت می‌کند که پرتو خورشید بر صفحه عمود شود.

با توجه به واحدهای کنترل سیستم‌های ردیابی خورشید دو دسته تقسیم‌بندی انجام می‌شود: (۱) سیستم ردیابی غیرفعال، (۲) سیستم ردیابی فعال.

در سیستم ردیابی غیر فعال از موتور الکتریکی و قسمت کنترل الکترونیکی استفاده نمی‌شود بلکه ردیابی با استفاده از سیستم‌های شیمیایی / مکانیکی و بر اساس ایده انبساط حرارتی مواد انجام می‌شود. معمولاً از کلروفلوروکربن (CFC) که در دو طرف صفحه خورشیدی قرار دارد، استفاده می‌شود [۵].

سیستم ردیابی فعال نیز به دو نوع زیر تقسیم می‌شود:

۱- سیستم ردیابی با استفاده از حسگر نوری، ۲- سیستم ردیابی بدون استفاده از حسگر نوری.

سیستم ردیابی با استفاده از حسگر نوری، به نسبت سیستم ساده‌ای است. در این سیستم‌ها معمولاً از چهار حسگر نوری برای ردیابی استفاده می‌شود که دو عدد از آنها برای ردیابی در جهت شرق به غرب و ۲ حسگر بعدی نیز برای ردیابی شمال-جنوب به کار می‌رود. ساده-ترین شکل یک حسگر نوری شامل یک مقاوت نوری است که ممکن است از نوع کادمیوم سولفید (CdS) یا نوع گالیوم آرسناید (GaAs) باشد که در ردیاب‌های خورشیدی معمولاً از نوع CdS استفاده می‌شود [۱۰-۶]. اما سیستم‌هایی که از حسگر برای تعیین موقعیت خورشید استفاده می‌کنند در مواقعی چون ۱- ابری بودن هوا، ۲- کثیف شدن سطح حسگر و تغییر مشخصات حسگر که به مرور زمان ایجاد می‌شود، دچار خطا و اشتباه می‌شوند. در سیستم‌های ردیابی بدون حسگر نوری این عیوب وجود ندارد. در سیستم ردیابی بدون حسگر که در مرجع [۱۱] معرفی شده از دو عدد PLC برای کنترل سیستم استفاده شده است. این سیستم با تقسیم روشنایی روز به چهار زمان و کنترل سرعت موتورها در هر یک از این زمانها عملیات ردیابی را در دو جهت شرق- غرب و شمال-جنوب انجام می‌دهد. روش دیگری که برای ردیابی دو محوره خورشید بدون حسگر وجود دارد استفاده از نقشه‌های خورشیدی (بر اساس نتایج تجربی به دست می‌آیند) است. در سال ۲۰۱۰ دواته^{۱۰} و همکاران یک سیستم ردیابی دو محوره را پیشنهاد کردند که بر اساس نقشه خورشیدی می‌باشد. این تحقیق که برای عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی (متوسط عرض جغرافیایی پرتغال) انجام شده است موقعیت خورشید در آسمان را در طول سال و برای هر یک ساعت یکبار شناسایی می‌کند [۱۲]. اما استفاده از فرمولهای ریاضی که برای زوایای خورشیدی وجود دارد دقت ردیابی را افزایش می‌دهند. بنابراین در مرجع [۱۳] ردیابی خورشید برای عرض جغرافیایی $30/4^\circ$ (عرض جغرافیایی شهر رفسنجان) و بر اساس فرمولهای زوایای سمت و ارتفاع انجام شده است که با کاهش مدت زمان بین هر دو ردیابی از یک ساعت به ۱۵ دقیقه از دقت مطلوبی

هر مکان بنا به طول جغرافیایی‌اش زمان خاص خود را دارد که زمان محلی نامیده می‌شود. به ازای هر ۱۵ درجه طول جغرافیایی زمان محلی یک ساعت تغییر می‌کند. مقدار معادله زمان و زمان خورشیدی را می‌توان از روابط زیر به دست آورد [۱۶]:

$$NDY^{\circ} = 360(\text{day} - 81) / 365 \quad (3)$$

$$EQT(\text{minute}) = 9.87 \sin(2 NDY^{\circ}) - 7.67 \sin(NDY^{\circ} + 78.7) \quad (4)$$

$$ST = LT + EQT + 4_{\text{Min}} (LT_{\text{Meridian}} - L_{\text{LOC}}) \quad (5)$$

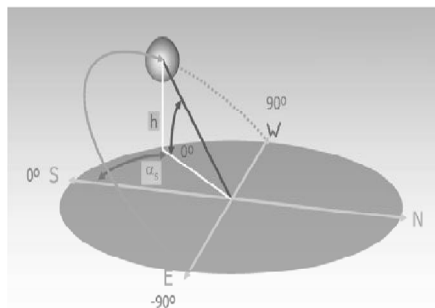
در این روابط EQT معادله زمان و برحسب دقیقه می‌باشد و متغیرهای LT، M مدار استاندارد برای ساعت محلی، L_{loc} طول جغرافیایی محل مورد نظر، ST زمان خورشیدی، LT ساعت محلی و day نیز روز سال و نسبت به اول ماه ژانویه حساب می‌شود، می‌باشند [۱۷].

۲-۳- مدل محاسبه زوایای خورشیدی

تبدیل انرژی در صفحات فتوولتائیک به میزان انرژی دریافتی از خورشید بستگی داشته و میزان انرژی تابشی خورشید به زاویه محلی آن وابسته است. روش کار مدل محاسبه زوایای خورشیدی، طی کردن مسیر منطقی معادلات زوایای خورشیدی از ابتدا تا به دست آوردن زوایای ارتفاع و سمت می‌باشد. محاسبات بسیاری برای زوایای سمت و ارتفاع وجود دارد و استفاده از هندسه مسطح روشی است برای به دست آوردن زوایای خورشیدی. شکل (۴) قسمتی از نیمکره سماوی را برای عرض جغرافیایی مورد نظر نشان می‌دهد که به نصف النهار مکان (نصف النهاری که از نقطه ZEN می‌گذرد) محدود است.

موقعیت خورشید در نیمکره سماوی با نقطه S نشان داده شده است. امتداد خط مسیر خورشید نیم‌دایره کوچک را در نقطه B قطع می‌کند. خط مورب OE که از مرکز عبور کرده است، مسیر خورشید را در روزهای اعتدالین نشان می‌دهد. میزان انحراف آن از خط عمود زوایای است که برابر با عرض جغرافیایی (LAT) می‌باشد. برای رسم مسیر خورشید در روزهای انقلاب تابستانی (۲۲ ژوئن) و انقلاب زمستانی (۲۲ دسامبر) ابتدا دو شعاع از نقطه O و با زاویه $\pm 23/45$ درجه نسبت به شعاع OE در دو طرف آن رسم می‌شود به گونه‌ای که نصف النهار را در دو نقطه J و D قطع کند. سپس دو خط موازی با OE که نشان دهنده مسیر خورشید در روزهای انقلاب می‌باشند، به طور جداگانه از نقاط J و D رسم می‌شود. یک نیم‌دایره کوچک روی خط مماس DJ بر نصف‌النهار به گونه‌ای رسم می‌شود که نقطه E مرکز نیم‌دایره باشد.

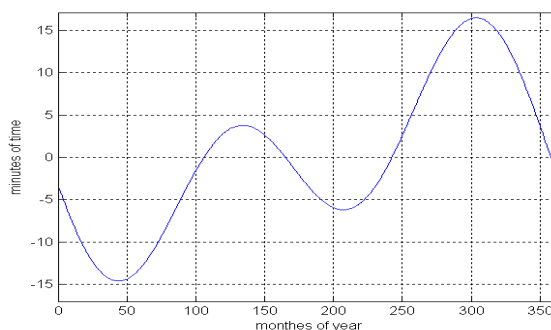
زاویه سمت (AZI) می‌باشد. مطابق شکل (۲) زاویه ارتفاع، زاویه بین اشعه خورشید و تصویر اشعه خورشید در صفحه افقی است. این زاویه بین صفر تا نود درجه متغیر است. زاویه سمت نیز زاویه بین تصویر اشعه خورشید در صفحه افقی و نقطه جنوب سماوی، در جهت عقربه‌های ساعت، است که بین صفر تا ۳۶۰ درجه متغیر می‌باشد [۱۵].



شکل (۲): زوایای خورشیدی [۱۲]
Fig. (2): Solar angles [12]

۲-۲- زمان خورشیدی متوسط و حقیقی

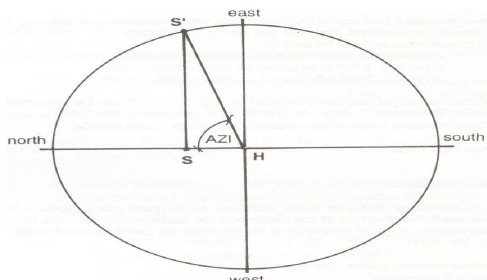
به دلیل بیضی بودن مدار حرکت زمین به دور خورشید فاصله زمین تا خورشید در طول یک سال ثابت نمی‌ماند. بنابراین سرعت حرکت مداری زمین زمانی که زمین به خورشید نزدیکتر است (حضیض، اول دی)، بیشتر از زمانی است که زمین از خورشید دورتر است (اوج، اول تیر). در نتیجه طول روز خورشیدی در ایام مختلف سال یکسان نیست. برای آنکه طول روز ثابتی برای اندازه‌گیری زمان وجود داشته باشد به جای خورشید حقیقی از خورشید متوسط (نقطه فرضی است که بر روی استوای سماوی جابجا می‌شود و سرعت ظاهری آن در طول سال ثابت است) استفاده می‌کنند. لحظه‌ای که خورشید حقیقی در نصف النهار مکان دیده می‌شود ظهر حقیقی یا ظهر شرعی گفته می‌شود و لحظه‌ای که خورشید متوسط بر نصف‌النهار مکان دیده می‌شود ظهر متوسط نامیده می‌شود. تفاوت ظهر حقیقی و ظهر متوسط که در طول سال بین منفی ۱۴ تا مثبت ۱۶ دقیقه تغییر می‌کند، را معادله زمان^{۱۰} (EQT) می‌نامند. در شکل (۳) گراف معادله زمان نشان داده شده است.



شکل (۳): تغییرات سالیانه معادله زمان
Fig. (3): Annual variations of the equation of time

$$\cos(AZI) = [\sin(LAT) \times \cos(DEC) \times \cos(HRA) - \cos(LAT) \times \sin(DEC)] / \cos(ALT) \quad (13)$$

رابطه بالا معمولترین رابطه برای زاویه سمت می‌باشد.



شکل (۵): صفحه افقی کره سماوی که از نقطه S عبور کرده است [۱۵]
Fig. (5): Horizontal plane of celestial sphere passing through point S [15]

این تحقیق برای شهر رفسنجان که دارای طول جغرافیایی ۵۶° غربی و عرض جغرافیایی ۳۰/۴° شمالی می‌باشد، انجام شده است. مدار استاندارد برای این شهر برابر با ۵۱° (طول جغرافیایی تهران) است و از قرار دادن روابط به دست آمده در کنار یکدیگر به یکسری روابط کامل برای

زوایای سمت و ارتفاع خورشید که به شکل زیر می‌باشند، می‌رسیم:

$$\text{latitude} = (30.4 \times \pi) / 180;$$

$$N = 2 \times \pi \times ((\text{day} - 1) / 365);$$

$$\text{NDY} = (360 \times (\text{day} - 81) / 365);$$

$$\text{EQT} = 9.87 \times \sin(2 \times \text{NDY} \times \pi / 180) - 7.67 \times \sin((\text{NDY} + 78.7) \times \pi / 180);$$

$$T = \text{minute} + \text{EQT} + 20;$$

$$\text{declination} = ((0.322003 - 22.971 \times \cos(N) - 0.357898 \times \cos(2 \times N) - 0.14398 \times \cos(3 \times N) + 3.94638 \times \sin(N) + 0.019334 \times \sin(2 \times N) + 0.05928 \times \sin(3 \times N)) \times \pi / 180);$$

$$\text{altitude} = \text{asin}(\sin(\text{declination}) \times \sin(\text{latitude}) + \cos(\text{declination}) \times \cos(\text{latitude}) \times \cos((15 \times (\text{time} + (T/60) - 12)) \times (\pi / 180)));$$

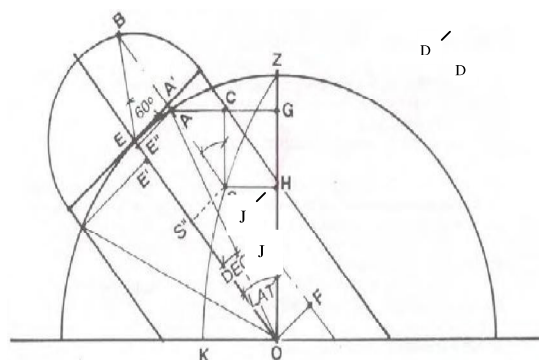
$$\text{azimuth} = (\text{acos}((\cos(\text{latitude}) \times \sin(\text{declination}) - \cos(\text{declination}) \times \sin(\text{latitude}) \times \cos((15 \times (\text{time} + (T/60) - 12)) \times (\pi / 180)))) / \cos(\text{altitude}));$$

$$\text{al} = (\text{altitude} / \pi \times 180);$$

$$\text{az} = (\text{azimuth} / \pi \times 180) - 180;$$

در این روابط time ساعت، minute دقیقه و day روز مورد نظر می‌باشند. پارامترهای azimuth altitude به ترتیب زوایای ارتفاع و سمت خورشید می‌باشند که در نهایت جهت برنامه نویسی با دو رابطه al و az نشان داده شده است.

تعیین مسیر حرکت روزانه خورشید پس از تعیین مواضع خورشید در ساعات و دقیق متفاوت روز و همچنین روزهای مختلف بر روی جدول به صورت نقاط مختلفی علامت‌گذاری می‌شود و سپس می‌توان با متصل کردن این نقاط به یکدیگر، مسیر حرکت روزانه خورشید را به صورت نمودار در جدول مربوطه ترسیم کرد. منحنی نمودار مسیر حرکت روزانه خورشید برای عرض جغرافیایی ۳۰/۴ درجه شمالی که توسط نرم افزار متلب رسم شده در شکل (۶) می‌توان مشاهده نمود.



شکل (۴): قسمتی از نیمکره سماوی در محل مورد نظر در نیمکره جنوبی [۱۵]
Fig. (4): Part of celestial hemisphere at (local) considered location on the southern hemisphere [15]

اگر شعاع نیمکره سماوی برابر یک فرض شود آنگاه می‌توان نوشت:

$$EA' = AE'' = \sin(DEC) \quad (6)$$

$$ZG = 1 - OG = 1 - \cos(LAT - DEC) = 1 - \cos(LAT) \times \cos(DEC) - \sin(LAT) \times \sin(DEC) \quad (7)$$

اگر نقطه S به نقطه S'' روی خط OE منتقل شود آنگاه با رسم یک کمان از شرق به غرب به طوری که از نقطه E بگذرد، می‌توان زاویه ساعت را به دست آورد (S'OS'' = HRA) و نقطه S' نقطه‌ای است بروی کمان. از آنجائی که AF = cos(DEC) و رابطه ES'' = 1 - AS'/ES'' = AF/EO و رابطه ES'' = A'S' cos(HRA) بنابراین می‌توان نوشت:

$$GH = AS' \times \cos(LAT) = \cos(DEC) \times (1 - \cos(HRA)) \times \cos(LAT) \quad (8)$$

$$ZH = ZG + GH = 1 - \sin(LAT) \times \sin(DEC) - \cos(HRA) \times \cos(DEC) \times \cos(LAT) \quad (9)$$

اگر یک کمان در نیمکره سماوی به گونه‌ای رسم شود که از نقطه اوج و نقطه S بگذرد آنگاه صفحه افقی را در نقطه K قطع می‌کند. بنابراین ZH = 1 - cos(ZEN) و از تساوی این رابطه با رابطه (۹) می‌توان زاویه ارتفاع خورشید را مطابق زیر محاسبه کرد. بنابراین:

$$\sin(ALT) = \sin(DEC) \times \sin(LAT) + \cos(LAT) \times \cos(DEC) \times \cos(HRA) \quad (10)$$

با در نظر گرفتن دو مثلث ACS و AOG خواهیم داشت:

$$AC = AS' \times \sin(LAT) \quad \text{و} \quad AG = \sin(LAT - DEC)$$

بنابراین:

$$\sin(LAT - DEC) - \cos(DEC) \times (1 - \cos(HRA)) \times \sin(LAT) \quad (11)$$

$$SH = AG - AC =$$

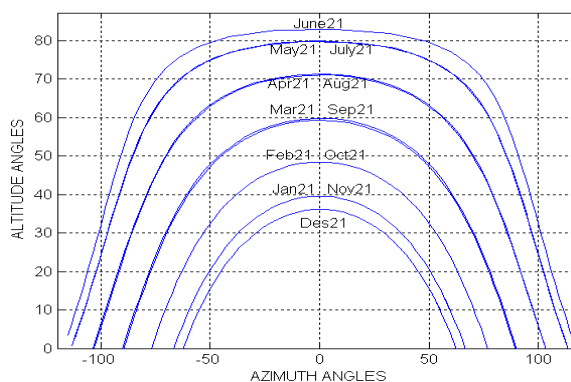
در شکل (۵) یک صفحه افقی نشان داده شده که از سطح S عبور کرده است. البته موقعیت دقیق خورشید در نقطه S' قرار دارد. شعاع این دایره با HS' نشان داده شده است. بنابراین از مثلث SHS' می‌توان نوشت:

$$SH = \cos(AZI) \times S'H = \cos(AZI) \times \sin(ZEN) \quad (12)$$

با تساوی دو رابطه SH و تعریف مثلثات می‌توان به رابطه زیر رسید:

شمارش زمان توسط خود تراشه می‌باشد. در این پژوهش از دو موتور پله‌ای^{۱۱} برای به حرکت در آوردن آرایه خورشیدی در جهت رو به خورشید استفاده گردیده است. از آنجائی که یک موتور پله‌ای را نمی‌توان مستقیماً به میکروکنترلر متصل نمود، از درایور L298 که با ورودیهای TTL سازگاری بهتری دارد، برای راه‌اندازی استفاده شده است [۲۳].

در این سیستم پیشنهادی میکروکنترلر با محاسبه دو زاویه سمت و ارتفاع خورشید از طریق روابط ریاضی زوایای خورشیدی موقعیت ظاهری خورشید را در آسمان پیدا می‌کند و سپس با دادن پالس‌های لازم، دو موتور پله‌ای به طور جداگانه به حرکت در می‌آیند. در اینجاست که آرایه خورشیدی در موقعیت رو به خورشید قرار می‌گیرد. از مزایای این سیستم مدیریت توان مصرفی در میکروکنترلر با استفاده از مد sleep می‌باشد. با ورود میکروکنترلر به یکی از مدهای sleep، میکروکنترلر به حالت بی‌کاری یا کم کاری می‌رود. بنابراین با برنامه‌ریزی میکروکنترلر می‌توان با اتمام روز میکروکنترلر وارد مد sleep کرد و با شروع روز بعد از این مد خارج نمود. پس از مشخص شدن الگوریتم ردیابی خورشید استفاده از فلوجارت روش مناسبی برای ارائه‌ی آن می‌باشد. در شکل (۸) فلوجارت حرکتی و ردگیری سیستم نشان داده شده است.

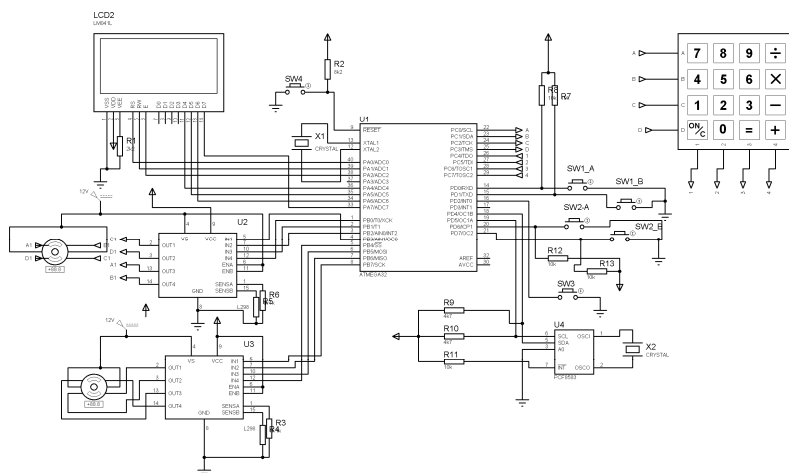


شکل (۶): نمودار حرکت ظاهری خورشید برای عرض جغرافیائی ۳۰/۴ درجه شمالی (شهرستان رفسنجان)

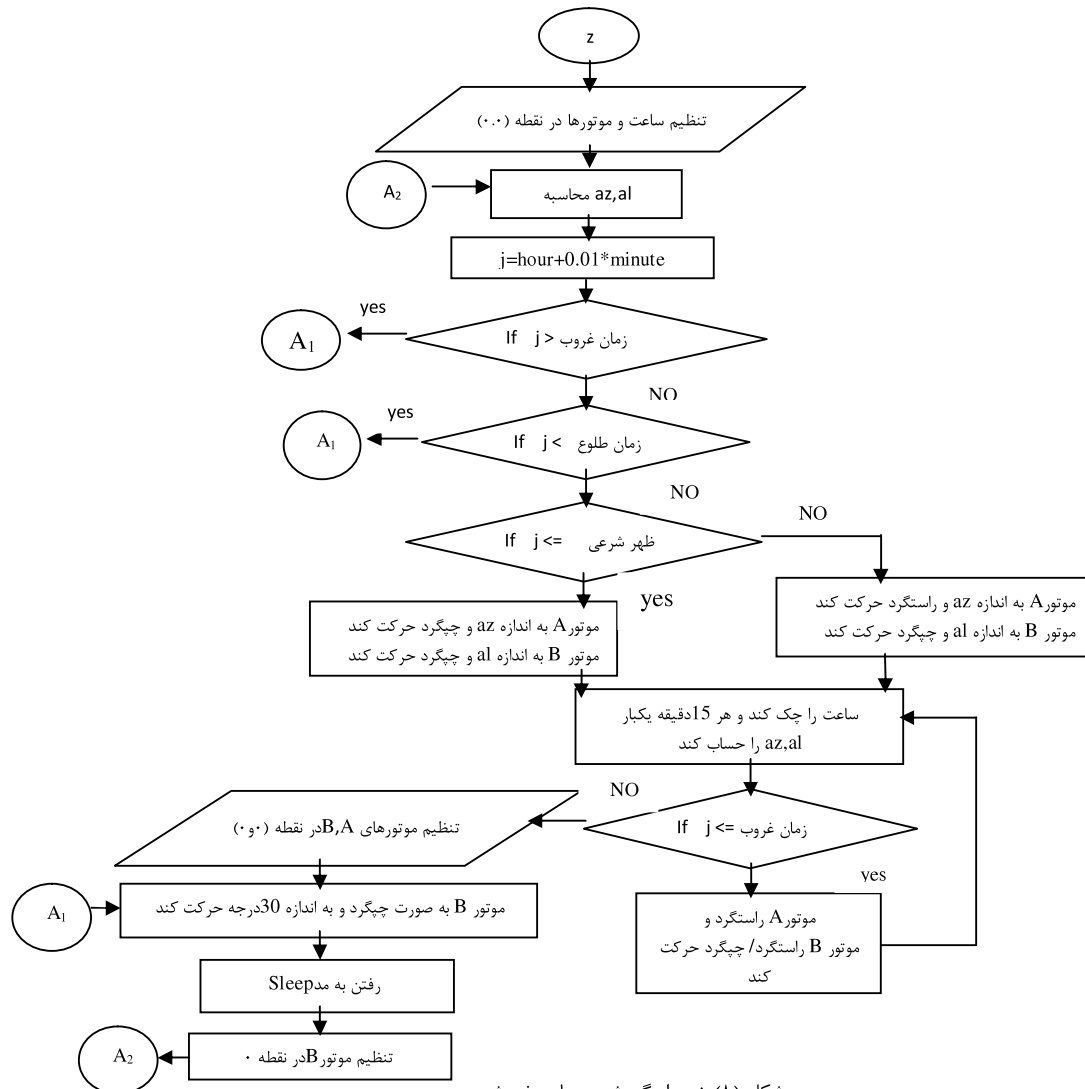
Fig. (6): Graph of sun's apparent movement for latitude of 30.4 degrees north (Rafsanjan city)

۳- طراحی ردیاب دو محوره خورشید

همان طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود از یک میکروکنترلر AVR مدل ATMEGA32 برای تولید فرامین مختلف و کنترل سیستم استفاده شده است. میکروکنترلرهای AVR دارای توان مصرفی پایینی هستند و می‌توانند با استفاده از یک منبع تغذیه ۲/۷ تا ۵/۵ ولتی از طریق شش پین ساده در عرض چند ثانیه برنامه‌ریزی گردند. همچنین آنها در هر جا که باشند با ۱/۸ ولت تا ۵/۵ ولت تغذیه می‌شوند [۲۲]. یک آی‌سی ساعت PCF8583 برای تولید زمان دقیق از طریق ارتباط سریال I2C به میکروکنترلر متصل شده است. این تراشه مجهز به RAM داخلی، تقویم سالیانه، هشدار روزانه و هفتگی و همچنین قابلیت



شکل (۷): ترسیم قسمت کنترلی سیستم ردیاب دو محوره خورشید در محیط پروتئوس
Fig. (7): Designing control section of two-axis solar tracking system in Proteus

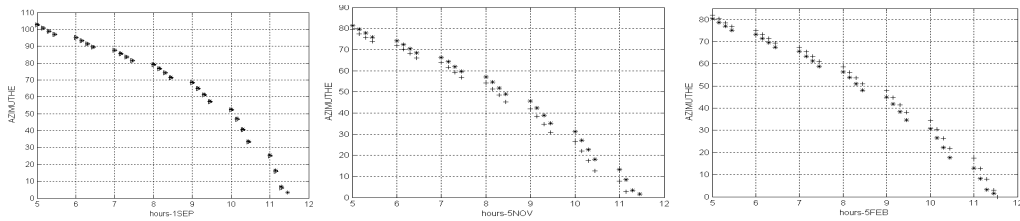


شکل (۸): نمودار گردش ریاضی خورشید
Fig. (8): Flowchart of sun tracking

۴- نتایج

مرجع [۱۳]، مشاهده نمود. لازم به ذکر است که شکل‌های (۹) و (۱۰) اندازه و شکل‌های (۱۱) و (۱۲) اختلاف زاویه سمت و اختلاف زاویه ارتفاع برای عرض جغرافیایی $30/4^\circ$ در حالی که معادله زمان در روابط آنها لحاظ شده با حالتی که معادله زمان در روابط زوایای خورشیدی به کار نرفته است را نشان می‌دهند. منحنی‌های شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب برای زاویه سمت و زاویه ارتفاع خورشید و مربوط به روزهای ۱ سپتامبر، ۵ فوریه و ۵ نوامبر می‌باشد. مقدار معادله زمان برای این سه روز نیز به ترتیب 0 ، -14 و $+16$ دقیقه است. در تمام شکل‌ها منحنی ستاره (*) مربوط به مرجع مذکور و منحنی با علامت جمع (+) برای این تحقیق می‌باشد. شکل (۱۱) برای روز ۵ نوامبر و شکل (۱۲) برای روز ۵ فوریه می‌باشد. در هر دو شکل اختلاف‌ها برای ساعت‌های بین ۵ تا $11:30$ صبح می‌باشد البته این اختلاف‌ها برای ساعت‌های بعد از ظهر دوباره تکرار می‌شود.

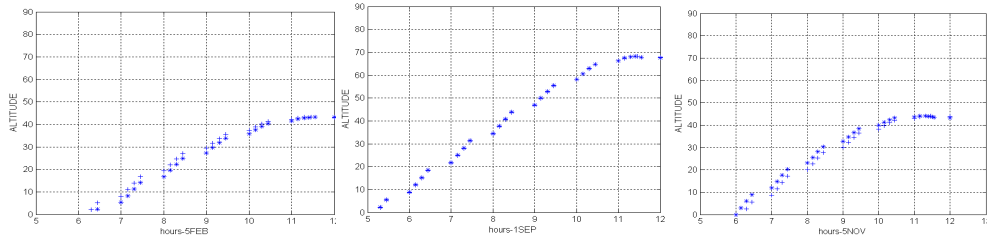
روابطی که در این تحقیق استفاده شده است در مقایسه با مراجع [۱۲ و ۱۳] از دقت بسیار بیشتری برخوردار است. به این دلیل که منحنی‌های مسیر ظاهری خورشید برای متوسط عرض جغرافیایی پرتغال ($40^\circ N$) در مرجع [۱۲]، به ازای هر ۱ ساعت می‌باشند (زمان بین هر دو ردیابی ۱ ساعت است) که در مقایسه با زمان بین هر دو ردیابی (هر ۱۵ دقیقه یکبار) در مرجع [۱۳] که بر اساس روابط زوایای خورشیدی برای شهر رفسنجان (عرض جغرافیایی $30/4^\circ N$) می‌باشد، این زمان طولانی‌تر می‌باشد. بنابراین مرجع [۱۳] از دقت بیشتری نسبت به مرجع [۱۲] برخوردار است. اما در این پژوهش به دلیل استفاده از معادله زمان در روابط زوایای خورشیدی نسبت به مرجع [۱۳] از دقت بیشتری برای پیدا کردن موقعیت دقیق ظاهری خورشید در آسمان برخوردار می‌باشد. این دقت در روابط را می‌توان در شکل‌های (۹) تا (۱۲) که مقایسه‌ای است بین روابط زوایای خورشیدی در این تحقیق و



(الف): تغییرات زاویه سمت در روز ۵ نوامبر (ب): تغییرات زاویه سمت در روز ۱ سپتامبر (ج): تغییرات زاویه سمت در روز ۵ فوریه
 (a): Variations of Azimuth Angle at November 5th (b): Variations of Azimuth Angle at September 1th (c): Variations of Azimuth Angle at February 5th

شکل (۹): مقایسه بین اندازه زاویه سمت در حالت با معادله زمان و حالت بدون معادله زمان

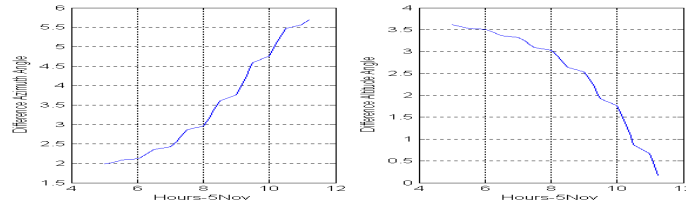
Fig. (9): Comparison between azimuth angle calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time"



(الف): تغییرات زاویه ارتفاع در روز ۵ نوامبر (ب): تغییرات زاویه ارتفاع در روز ۱ سپتامبر (ج): تغییرات زاویه ارتفاع در روز ۵ فوریه
 (a): Variations of Altitude Angle at November 5th (b): Variations of Altitude Angle at September 1th (c): Variations of Altitude Angle at February 5th

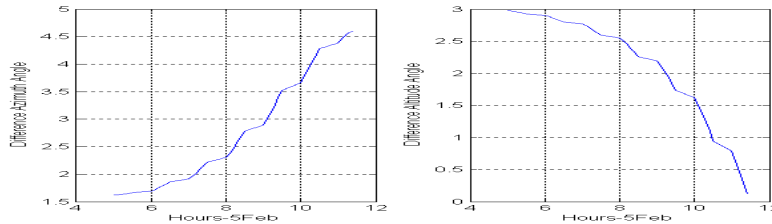
شکل (۱۰): مقایسه بین اندازه زاویه ارتفاع در حالت با معادله زمان و حالت بدون معادله زمان

Fig. (10): Comparison between altitude angle calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time"



شکل (۱۱): اختلاف بین دو زاویه سمت و دو زاویه ارتفاع محاسبه شده با معادله زمان و بدون معادله زمان برای روز ۵ نوامبر

Figure(11): Difference between two azimuth angles and two altitude angles calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time" for November 5th



شکل (۱۲): اختلاف بین دو زاویه ارتفاع و دو زاویه سمت محاسبه شده با معادله زمان و بدون معادله زمان برای روز ۵ فوریه

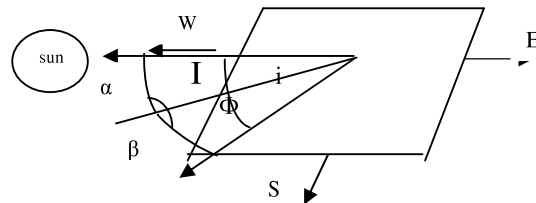
Fig. (12): Difference between two azimuth angles and two altitude angles calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time" for February 5th

$$\cos(i) = \cos(\alpha)\cos(\beta) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\Phi) \quad (14)$$

در این رابطه α اختلاف زاویه ارتفاع در حالت با معادله زمان و با حالت بدون معادله زمان، β اختلاف زاویه سمت در حالت با معادله زمان و با حالت بدون معادله زمان و Φ نیز زاویه بین کمان اختلاف زاویه ارتفاع خورشید با کمان اختلاف زاویه سمت می باشد.

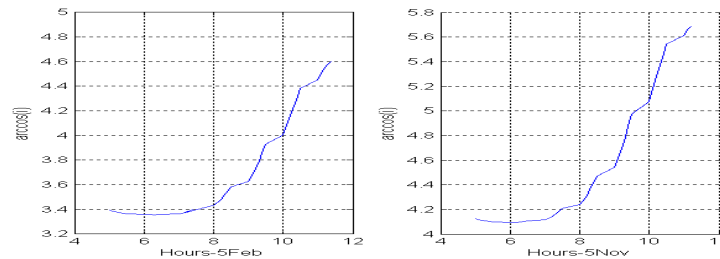
از آنجائی که توان خروجی سلول به زاویه میان پرتوهای خورشید و بردار نرمال صفحه فتوولتائیک بستگی دارد. مقایسه‌ی دیگری بین روابط زوایای خورشیدی در حالت با معادله زمان و حالت بدون معادله زمان انجام شده است.

طبق شکل (۱۳) اختلاف زاویه تابش (در حالتی که معادله زمان استفاده نشده با حالت با معادله زمان) را می توان با استفاده از قانون مثلثات در نجوم کروی، و به شکل زیر به دست آورد:



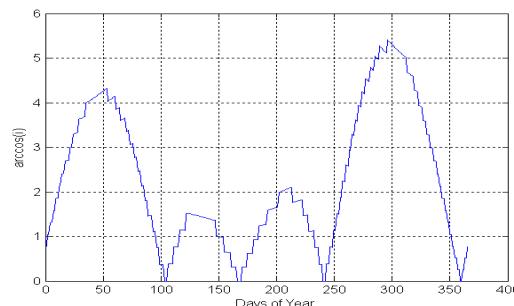
شکل (۱۳): اختلاف زاویه تابش i ، ارتفاع خورشید α و سمت خورشید β

Fig. (13): Difference of incidence angle (i), altitude (α) and azimuth (β)



شکل (۱۴): اختلاف زاویه تابش محاسبه شده با معادله زمان و بدون معادله زمان

Fig. (14): Difference of incidence angle calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time"



شکل (۱۵): اختلاف زاویه تابش محاسبه شده با معادله زمان و بدون معادله زمان برای تمام روزهای سال

Fig. (15): Difference of incidence angle calculated with using the "equation of time" and without using the "equation of time" for all days of year

شدن زوایای به دست آمده می‌باشد. البته دلیل دیگر استفاده از متغیر دقیقه است. این سیستم در واقع یک سیستم مستقل از شرایط آب و هوایی است که حتی در شرایطی که آسمان ابری است زوایای خورشید محاسبه و آرایه فتوولتائیک در جهت رو به خورشید قرار می‌گیرد. روشن است که ردیابی تنها به عرض جغرافیایی، زمان و روز بستگی دارد. برای پیاده‌سازی سیستم کنترل از یک میکروکنترلر کم مصرف برای کاهش هزینه‌ها در مقایسه با دیگر سیستم‌های موجود، استفاده شده است. این سیستم قادر می‌باشد صفحه خورشیدی را در طول روز ۱۸۰ درجه از طلوع تا غروب (از شرق تا غرب) و ۹۰ درجه از صبح تا عصر (از پایین تا بالا و بالعکس) کاملاً روبروی خورشید به حرکت در آورد. به همین دلیل موجب بهره‌گیری صفحات خورشیدی از حداکثر زمان تابش نور خورشید می‌شود. البته با پیشرفت سیستم‌های هوشمند انتظار می‌رود که در آینده‌ای نزدیک از انواع این سیستم‌های هوشمند در این گونه سیستم‌های ردیابی استفاده شود تا دیگر نیازی به حسگرها برای ردیابی نباشد.

شکل (۱۴) دو منحنی که نتیجه اختلاف زاویه تابش در حالت با معادله زمان و حالت بدون معادله زمان می‌باشد، و نیز شکل (۱۵) کسینوس زاویه i ، برای تمام روزهای سال و در ساعت ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این افزایش دقت بدون صرف هیچ هزینه‌ای و تنها با اعمال معادله زمان در روابط زوایای خورشیدی برای سیستم ایجاد شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این طرح یک سیستم برای ردیابی نور خورشید که بر اساس استراتژی کنترل حلقه باز و استفاده از روابط دقیق زوایای خورشیدی به گونه‌ای که دقت سیستم را بدون صرف هیچ هزینه‌ای افزایش داده است، جهت تولید توان ماکزیمم طراحی گردید. تفاوت این سیستم نسبت به تمام مراجعی که از روش بدون حسگر استفاده کرده‌اند این است که در آن مراجع مدت زمان شبانه روز برای همه روزهای سال ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده اما در این مقاله تغییرات مدت زمان یک شبانه روز در طول سال در نظر گرفته شده است که دلیل اصلی دقیق‌تر

پی نوشت:

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| 1- Photovoltaic | 7-Ecliptic |
| 2- Degree of Freedom | 8-Declination |
| 3-Vertical Single Axis Tracker | 9-Zenith |
| 4-Horizontal Single Axis Tracker | 10-Equation of Time |
| 5-Tilted Single Axis Tracker | 11-Stepper Motor |
| 6-Duarte | |

References

- [1] P. Azizyan, "Novel tracking technique of maximum power point (MPPT) and control of DC/DC converter for solar cells", NEEC, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Feb. 2010.
- [2] G. Martina, "Solar cells, operating principles", Technology & System Applications, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1982.
- [3] R.C. Neville, "Solar energy collector orientation and sun tracking mode", Solar Energy, Vol. 20, No. 1, pp. 7-11, 1978.
- [4] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, A. Sharifi, "A review of principle and sun – tracking methods for maximizing solar systems output", Ren. And Sus. Ene. Rev., Vol. 13, No. 8, pp. 1800-1818, Oct. 2009.
- [5] M.J. Clifford, D. Eastwood, "Design of a novel passive solar tracker", Solar Energy, Vol. 77, No. 3, pp. 269-80, 2004.
- [6] M.M. Azimi, A. Parvaresh, M.A. Mohammadi, "Design and construction a new and optimized Mechatronical sun tracking system", ACCE, Kerman, 2010.
- [7] A.J. Novinrooz, M.R. Ghasemi, M. Mohati, H. Sadri, "Design and fabrication of sun tracker", Jou. of Nuclear Sci. & Tec., Vol. 27, pp. 27-35, 2003.
- [8] M. Jalilian, H. Mohamad Nezami, M. Boroushaki, "Modeling, simulation and fuzzy controller of a solar tracker for photovoltaic systems", AICME, University of Tehran, 2009.
- [9] O. Stalter, B. Burger, S. Bacha, D. Roye, "Fraunhofer- inst, for solar energy system (ISE)", Gippsland, VIC: IEEE International Conference, 2009.
- [10] N. Barsoum, P. Vasant, "Simplified solar tracking prototype", Global Journal of Technology & Optimization, Vol. 1, Transaction in Controllers and Energy, ISSN: 1985- 9406 on line Publication ES-E11/GJTO, 2010.
- [11] R. Mamlook, S. Nijmeh, S.M. Abdallah, "A programmable logic controller to control two-axis sun tracking system", Inf. Tec. Jou., Vol. 5, No. 6, pp.1083-1087, 2006.
- [12] F. Duarte, P.D. Gaspar, L.G. Goncalves, "Two axis solar tracker based on solar maps, controlled by a low- power micro controller", ICREPQ, Granada, Spain, 2010.
- [13] F. Esmaili Ranjbar, H. Fatehi marj, Gh. Shahgholian, "Two- axis solar tracking based on solar map and without using sensor, by using AVR microcontroller", ACCE, Kerman, 2012.
- [14] J.E. Peacock, "Solar data for Hong Kong", Technical Notes No.14, Publisher Royal Observatory, Hong Kong, 1976.
- [15] S.V. Szokolay, "Solar geometry", Second revised edition by plea: Passive and low energy architecture international design tools and techniques in association, 2007.
- [16] J.H. MEEUS, "Mathematical astronomy morsels", Publisher: Willmann-Bell, Incorporated, 1997.
- [17] A. Haj Saghati, "Principles and operation of solar energy", Second Edition, Published by university of science and industry, Tehran, 2001.
- [18] L. AddleSon, "Sunlight geometry notes: Building environment and services", Brunel University, 1973.
- [19] R. Kittler, "A universal calculation method for simple predetermination of natural radiation on building surfaces and solar collectors", Building and Environment, Vol. 16, No. 3, pp. 177-182, 1981.
- [20] E.B. Penrod, "Solar load analysis by use of orthographic projections and spherical trigonometry", Solar Energy Vol. 8, No. 4, pp. 127-133, 1964.
- [21] N. Robinson, "The astronomical and geographical factors affecting the amount of solar radiation reaching the earth", Solar radiation, Elsevier, Esp. Chapter 2, 1966.
- [22] M. Mohammadi, M. Akhondi, A. Sanjeedehmotlagh, "Operational education of AVR microcontrollers", first Edition, Published by Naghshesimorgh art cultural institute, Tehran, 2010. (In Persian)
- [23] H. Badaminejat, "Education of AVR microcontrollers", Second Edition, Published by Jahane no, Tehran, 2009. (In Persian)

