

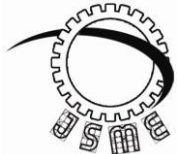
ساخت کالکتور خورشیدی متمرکز کننده سهموی خطی و پیش بینی عملکرد آن

محمود تاجی^{۱*}

* نویسنده مسئول: mhdtaji.mt@gmail.com

واژه‌های کلیدی	چکیده
کالکتور خورشیدی متمرکز کننده سهموی خطی سطح منعکس کننده فولاد آینه ای	هدف از انجام این تحقیق ساخت و پیش بینی عملکرد کالکتور خورشیدی متمرکز کننده است که طرح کلی آن همانند طرحهای رایج این نوع کالکتور بوده، ولی سطح منعکس کننده بجای آینه از ورق نازک فولاد آینه ای است. برای ساخت ابتدا سازه اصلی نگهدارنده با اتصال موازی سازه های پیش ساخته V شکل صفحه ای ساخته شد و یک کمان سهمی شکل تفلنی بعنوان تکیه گاه سطح منعکس کننده در دهانه هر سازه نصب گردید. سپس ورق فولادی در دهانه سازه اصلی به شکل سهمیگون مونتاژ شد. بقیه قسمتها مشابه روشهای مرسوم ساخته و مونتاژ گردید. برای پیش بینی عملکرد، پس از تعیین رابطه راندمان بصورت تابعی از زاویه اصابت تابش خورشید بر مبنای تئوریهای این نوع کالکتور، راندمان و نرخ خالص جذب گرما به کمک نرم افزار متلب و برنامه نویسی در محیط ان محاسبه و برحسب زمان ظاهری خورشید در چند روز سال رسم گردید. نتایج نشان داد اگر تابش خورشید به امتداد عمود برافق نزدیک باشد، راندمان از ۵۰٪ در صبح تا ۶۰٪ در ظهر افزایش یافته و بعد از ظهر تا عصر به ۵۰٪ کاهش میابد. در غیر اینصورت راندمان از ۶۰٪ در صبح به ۵۰٪ در ظهر کاهش یافته و مجدداً تا ۶۰٪ در عصر افزایش میابد. نرخ خالص جذب گرما (w/m^2) هر دو حالت در ظهر حداکثر (۴۵۰-۵۵۰) و در صبح و عصر حداقل (۴۰۰-۴۵۰) بود. گرچه راندمان کالکتور ساخته شده با راندمان کالکتورهای معمول تفاوت چندانی ندارد، اما زمان و هزینه کمتر برای مونتاژ آن و کیفیت بالاتر شکل هندسی و دوام بیشتر سطح منعکس کننده در مقایسه با کالکتورهای معمول قابل ملاحظه است.
تاریخ ارسال: ۹۵/۰۷/۰۶	
تاریخ بازنگری: ۹۵/۱۰/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۰	

۱- عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.



Manufacturing a Trough Parabolic Solar Collector and Predicting its Theoretical Performance

Mohmood Taji^{1,*}

* Corresponding Author: mhdtaji.mt@gmail.com

Abstract:

The aim of this research was manufacturing a parabolic trough solar collector in which reflecting surface is made of mirror steel rather than usual mirror and also predicting its theoretical performance. By adjusting planar V-shaped structures parallel to each other and welding them together, the main supporting structure was assembled and a parabolic-shape Teflon arc was installed in the aperture of each V-shaped structure. Then the steel plate was installed on the main structure to form a parabolic trough surface. Other components were manufactured and assembled according to conventional methods. In order to predict performance, efficiency was formulated as a function of incident angle according to the related theory. By programming in MATLAB, net rate of heat absorption and efficiency were calculated and corresponding diagrams plotted against apparent solar time for several days of the year. The results indicated that when solar radiation was close to vertical, efficiency increased from fifty percent in the morning to sixty at noon and decreased to fifty again in the afternoon. Otherwise it decreased from sixty percent in the morning to fifty at noon and increased to sixty again in the afternoon. Maximum net rate of heat absorption (W/m^2) occurred at noon (450-550) and the minimum at sunrise and sunset (400-450). Although the efficiency of the manufactured collector is slightly different from that of usual ones, less assembly time and cost and higher quality of surface geometry and more durability of reflecting surface are considerable compared with conventional collectors of this type.

Key words:

Solar collector
Concentrator
Trough Parabolic
Reflecting surface
Mirror steel

۱- مقدمه

$0/67 =$ بدست آمد. همچنین با توجه به معادله سهمی و

انتخاب عرض دهانه دو متر خواهیم داشت: $f y_r = 0/25$

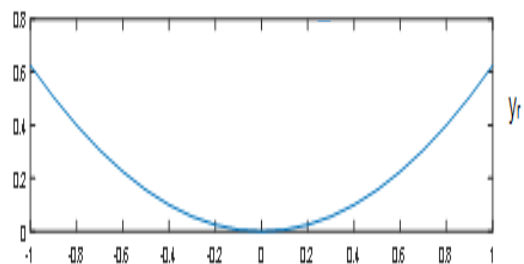
از حل همزمان دو معادله اخیر $f = 0/4$ و $y_r = 0/6$ بدست میاید و ابعاد هندسی سهمی دقیقاً معلوم می شود.

چون سطح منعکس کننده معمولاً "آسیب پذیر یا قابل انعطاف است لذا به یک سازه مستحکم برای حفظ شکل خود نیاز دارد. این سازه در این طرح ۷ شکل با عرض دهانه دو متر (برابر عرض دهانه سهمی) و طول چهارمتر انتخاب شده است. انتخاب طول نیز اختیاری انجام شد بطوریکه در شرایط زمستان با بازدهی کل حدود چهل درصد و شدت تابش ۵۰۰ وات بر متر مربع روی سطح کالکتور توان خروجی حدود ۱/۵ kw بدست آید. البته در اشل صنعتی طول این کالکتورها بسیار زیاد است و تا دویمتر متر میرسد. به منظور سبکی، این سازه فقط شامل اسکلت فلزی سبک ساخته شده از پروفیل های صنعتی سبک است

روشهای مرسوم برای ساخت کالکتور سهموی خطی عبارتست از ساخت یک سازه نگهدارنده سبک فلزی با مقطع ۷ شکل یا سهمی شکل با طول معین و نصب سطح منعکس کننده سهمیگون در دهانه آن به روشهای مختلف. سطح سهمیگون که لوله جاذب یا رسیور در کانون آن نصب میشود، بطرق مختلف ایجاد میشود و از جنسهای گوناگون میباشد [۴]. روش های بکار رفته برای ایجاد شکل سهمیگون اغلب پیچیده و پرهزینه بوده و جنس بکار رفته در آن، که در اکثر موارد شیشه ای است، به شدت آسیب پذیر بوده و فرم دهی آن وقتگیر است. لوله جاذب که روی خطی کانونی آینه و هم محور با آن نصب می شود از جنس فلزی با ضریب هدایت حرارتی بالا بوده و سطح خارجی آن با پوششی از ماده ای با ضریب جذب بسیار بالا در برابر نور خورشید مثل کرم سیاه پوشیده می شود. همچنین یک لوله ی شیشه ای شفاف هم محور با لوله جاذب، به منظور

کاربرد روز افزون انرژی خورشیدی نیاز به تجهیزات جمع کننده یا دریافت کننده نسبتاً ارزان با راندمان بالا برای این نوع انرژی را افزایش میدهد. یکی از این تجهیزات جمع کننده یا کالکتور خورشیدی است که برای بدام انداختن انرژی خورشیدی بکار میرود. در صورت نیاز به دمای بالا کالکتور علاوه بر جمع آوری باید انرژی خورشیدی را روی یک خط مستقیم یا یک نقطه منفرد متمرکز کند [۱].

شکل هندسی سطح منعکس کننده در کالکتور سهموی خطی سهمیگون است که معادله دو بعدی آن $x^2=4fy$ میباشد، چراکه فقط در این شرایط دسته اشعه موازی خورشید که بطور عمودی یا تقریباً عمودی به سطح آفتابگیر وارد میشود پس از انعکاس روی خط کانونی متمرکز گشته و توسط جاذب جذب میگردد. در معادله فوق f فاصله کانونی سهمی از محور افقی است.



شکل (۱) نمودار سهمی بهینه مقطع کالکتور

عرض دهانه سهمی برابر دو متر انتخاب گردید. همچنین ضریب بدام اندازی تابش منعکس شده از سطح آینه توسط رسیور (جاذب) با مقدار معمول ۰/۹ انتخاب گردید. سپس از مرجع [۲] قطر بهینه لوله رسیور سی و پنج میلی متر بدست آمد. بدین ترتیب نسبت تمرکز (نسبت سطح دهانه کالکتور بر واحد طول به قطر لوله جاذب) برابر پنجاه و هفت بدست میاید. با معلوم بودن این کمیت از مرجع [۳] نسبت فاصله کانونی به عمق سهمی برای طراحی بهینه f/y_r

دسته اشعه خورشید و خط عمود بر سطح آفتابگیر) بوده که در طول روز متغیر است و سایر پارامترهای اپتیکی کالکتور نظیر ضریب انعکاس سطح منعکس کننده و ضریب جذب سطح خارجی لوله رسیور و ضریب عبور لوله شیشه ای و ضریب بدام اندازی تابش منعکس شده خورشید توسط رسیور که همگی مقادیر ثابتی میباشند در راندمان اپتیکی موثر هستند. در صورت نصب در امتداد شمالی-جنوبی راندمان کلی در طول روز تغییرات کمتری دارد و به راندمان ماکزیمم نزدیکتر میماند. لذا در این طرح کالکتور در امتداد شمالی-جنوبی نصب شد.

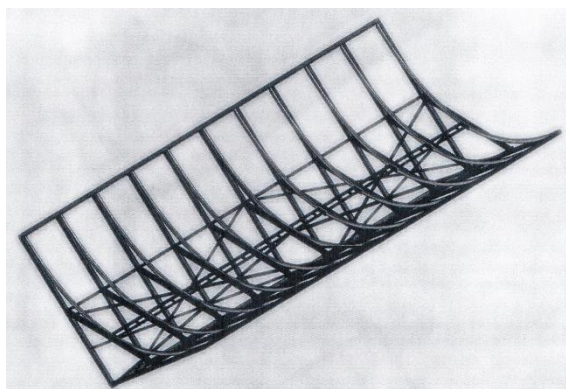
۲- روش تحقیق

۲-۱- روش ساخت

۲-۱-۱- ساخت سازه اصلی نگهدارنده آینه

سهمیگون

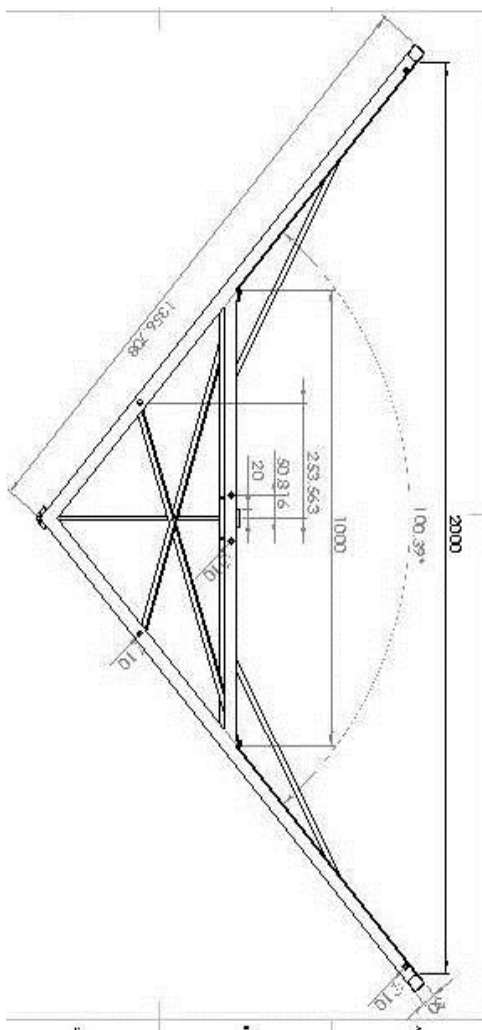
شکل کلی سازه نگهدارنده در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، این سازه از تعداد سازه ی صفحه ای ۷ شکل تشکیل شده است، که به طور موازی کنار یکدیگر قرار می گرفته و بهم جوش داده شده اند. این سازه که از پروفیل های سبک صنعتی ساخته شده، وظیفه نگهداری و حفظ شکل سهمیگون ورق فولاد آینه ای را بر عهده دارد.



شکل (۲) سازه اصلی نگهدارنده

کاهش اتلاف حرارتی بر اثر جابجایی با هوای اطراف، روی لوله نصب می شود و در فضای بین این دو خلا ایجاد می کنند تا باز هم اتلافات حرارتی کاهش یابد. آینه باید به گونه ای نصب شود که محور طولی آن در امتداد شمالی - جنوبی یا غربی-شرقی قرار گیرد. همچنین آینه باید با شیب مناسبی نسبت به افق نصب گردد، تا همواره زاویه تابش آفتاب با خط عمود به سطح آفتابگیر حداقل گردد. زاویه ی شیب به موقعیت جغرافیایی محل نصب بستگی دارد، و نیز با تغییر ماه و فصل و تغییر می کند. چرخش آینه حول محور طولی که از مرکز ثقل عبور می کند، باید امکان پذیر باشد، به طوری که کالکتور بتواند در طول روز خورشید را دنبال کند.

چون این کالکتور از نوع انعکاسی است، لذا از روش راندمان اپتیکی برای پیش بینی عملکرد آن استفاده شد. در این نوع کالکتور تابش دیفیوز خورشید توسط اتمسفر به سطح آن تاثیر ناچیز در عملکردش دارد، زیرا این نوع تابش بطور نامنظم از سطح آینه بازتابش دارد و کاملاً در روی خط کانونی متمرکز نشده و در رسیور جذب نمیگردد. به همین دلیل فقط تابش مستقیم خورشید بر روی سطح آینه در محاسبات منظور شد. البته چون خورشید دقیقاً "یک منبع تابش نقطه ای نیست، لذا تابش وارده به هر نقطه از سطح آینه در یک مخروط با زاویه راس سی دقیقه (راس مخروط واقع بر نقطه تابش روی سطح آینه) وارد گشته و به همین شکل نیز منعکس میگردد. محاسبه ضریب بدام اندازی تابش انعکاس یافته از سطح آینه توسط رسیور بر مبنای این واقعیت قرار دارد. دسته اشعه خورشید نیز همواره بطور موازی به سطح آفتابگیر وارد میشود. البته جهت آن نسبت به سطح آفتابگیر تابع زاویه سمت الراس خورشیدی و زاویه میل کالکتور و زاویه انحراف محور کره زمین است. راندمان اپتیکی تابع زاویه اصابت تابش خورشید (زاویه بین



شکل (۳) نقشه سازه ۷ شکل

سازه ۷ شکل بسته شد و پس از تنظیم دقیق محل های اتصال جوشکاری شد و به این ترتیب یک سازه ی صفحه ای ۷ شکل ساخته شد. رعایت دقیق زوایا و طول ها در این سازه از اهمیت ویژه ای برخوردار است چرا که در غیر این صورت سطح سهمیگون منعکس کننده ناصاف یا غیردقیق خواهد بود و تمرکز انرژی منعکس شده روی خط کانونی (لوله ی جاذب) اتفاق نمی افتد و باعث افت شدید بازدهی کالکتور می گردد. همچنین همه ی سازه های ۷ شکل یکسان و طبق نقشه ساخته شود. عدم تطابق یکی از این سازه ها موجب ایجاد اختلال در شکل سهمیگون خواهد بود به همین جهت پس از ساخت آخرین سازه ۷ شکل، انطباق دقیق سازه ها بر یکدیگر کنترل گردید.

صلبیت، سبکی و استحکام از ویژگی های ضروری این سازه است. برای ساخت این سازه، ابتدا سازه های ۷ شکل صفحه ای به تعداد لازم ساخته شده و به طور موازی به هم متصل می شود. با تغییر سازه های ۷ شکل، طول آینه قابلیت کم و زیاد شدن را دارد.

۲-۱-۲- ساخت سازه های ۷ شکل

در شکل مقابل نقشه دقیق سازه ۷ شکل نشان داده شده است. این سازه از پروفیل های فولادی صنعتی با ابعاد مقطع 3×5 سانتی متر ساخته شده است. انتخاب زاویه صد درجه در محدوده بهینه انجام شده است تا نسبت سطح زیر آفتاب به سطح کالکتور بهینه گردد. پروفیل افقی نصب شده در دهانه ی سازه برای نصب تکیه گاه ورق فولادی آینه ای یعنی کمان های تفلونی سهمی شکل منظور شده به طوری که در دهانه ی هر سازه ۷ شکل یک کمان تفلونی نصب گردد. شکل سهمی این کمان ها طوری ساخته شده که با نشست ورق فولادی آینه ای روی آن و اندکی فشار، ورق فولادی شکل مورد نظر سهمیگون را به خود خواهد گرفت. این روش برای ایجاد سطح منعکس کننده سهمیگون در یک کالکتور خورشیدی در این طرح منحصر به فرد بوده و از ویژگی های مهم این روش ساخت می باشد که باعث کاهش هزینه و زمان مورد نیاز برای ساخت می گردد. برای ساخت سازه ۷ شکل ابتدا اضلاع آن یعنی دو پروفیل های با ابعاد مقطع 3×5 سانتی متر هر یک به طول $1356/7$ میلی متر تهیه گردید و یک سر از هر کدام تحت زاویه 40 درجه فارسی بر گردید. سپس این دو ضلع توسط فیکسچری که قبلا تهیه شده بود کنار یکدیگر قرار گرفت و پس از تنظیم دقیق بین دو شاخه به یکدیگر جوش داده شد.

در پایان پروفیلی به طول یک متر و ابعاد مقطع 3×5 سانتی متر که هر دو سر آن تحت زاویه 50 درجه فارسی بر شده بود توسط دو فیکسچر به شاخه های چپ و راست

۳-۱-۲- ساخت کمان سهمی شکل

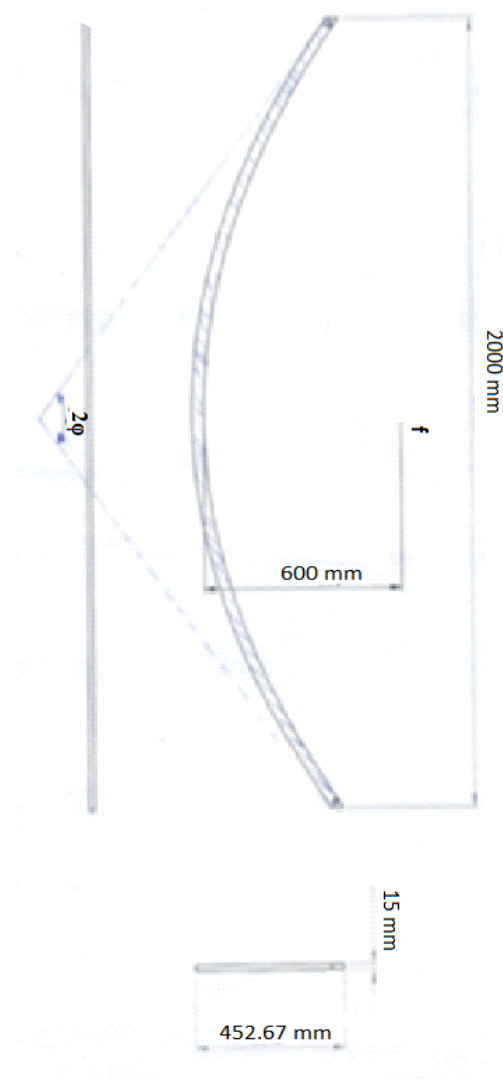
نقشه یک کمان سهمی شکل در ادامه آمده است. همانطور که در شکل دیده می شود عرض دهانه دو متر، فاصله کانونی از پایین ترین نقطه ۶۰ سانتی متر و ضخامت آن عمود بر صفحه ی کاغذ ۱/۵ سانتی متر است. چون این سهمی ها تکیه گاه و فرم دهنده ی شکل نهایی ورق فولادی آینه ای هستند. ابعاد آن ها طوری انتخاب شده که بیشترین

را داشته باشند و در عین حال مقاومت کافی در برابر خوردگی و فرسایش در محیط را دارا باشد.

برای ساخت این کمان ها از ماشین تراش CNC استفاده گردید تا پروفیل سهمی مورد نظر طبق نقشه به طور دقیق ایجاد گردد. برای تقویت مکانیکی کمان ها یک صفحه ی فلزی نازک سهمی شکل همانند کمان به یک طرف از هر کمان پرچ شده است بدین ترتیب صلیبیت کمان های سهمی شکل نیز افزایش می یابد.

۴-۱-۲- لوله جاذب (رسیور) و ساخت آن

لوله جاذب در واقع قلب کالکتور است و جذب تابش خورشید و تبدیل آن به گرما در این لوله اتفاق می افتد. بدین منظور این لوله باید طوری ساخته شود که بیشترین جذب انرژی خورشید و کمترین اتلاف گرما در آن رخ دهد. همانطور که در شکل زیر دیده می شود لوله ی جاذب یک لوله مستقیم به قطر ۳/۵ سانتی متر از جنس فولاد ضدزنگ است که طول آن کمی از طول کالکتور بیشتر است. سطح خارجی این لوله با پوشش کرم سیاه آبکاری شده تا ضریب سطح خارجی در برابر تابش خورشید به حداکثر ممکن حدوداً ۰/۹ برسد. این لوله ی فولادی در درون یک لوله ای شیشه ای شفاف به قطر ۵/۵ سانتی متر به طور هم محور با آن نصب شده تا اتلافات حرارتی جابجایی با هوای محیط اطراف را کاهش دهد. برای نصب لوله شیشه ای روی لوله ی فولادی از حلقه هایی از جنس کانوچو (پایه) استفاده شده است. سطح داخلی حلقه روی لوله ی فولادی چسبانده شده و لوله شیشه ای روی سطح خارجی حلقه نصب گردیده است.



شکل (۴) کمان سهمی شکل

انرژی تابشی خورشید پس از انعکاس در لوله جاذب (رسیور) جذب گردد. جنس کمان ها از تفلون انتخاب شده تا انعطاف پذیری لازم برای نشستن صفحه فولادی آینه ای

در این رابطه زاویه ساعت خورشیدی از معادله زیر محاسبه میشود:

$$h_s = 15 (t_s - 12) \quad (4)$$

t_s زمان ظاهری خورشیدی بوده و تفاوت اندکی با زمان محلی دارد. بدین ترتیب در هر زمان در طول روز آفتابی می توان شدت تابش خورشید روی سطح کالکتور را بدست آورد. همچنین زاویه اصابت تابش خورشید در هر لحظه از رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\cos i = \{ [\sin(L - \beta) \sin \delta_s + \cos(L - \beta) \cos h_s \cos \delta_s]^2 + (\cos \delta_s \cos h_s)^2 \}^{1/2} \quad (5)$$

در رابطه فوق β زاویه شیب کالکتور نسبت به افق محل است. سپس راندمان اپتیکی در هر لحظه از رابطه زیر بدست میاید:

$$\eta_{opt} = \rho_m \tau_c \alpha_r \delta [(1 - \text{Atan } i) \cos i] \quad (6)$$

δ در رابطه فوق ضریب بدام اندازی تابش منعکس شده از سطح آینه توسط ریسور بوده و از رابطه زیر محاسبه میشود:

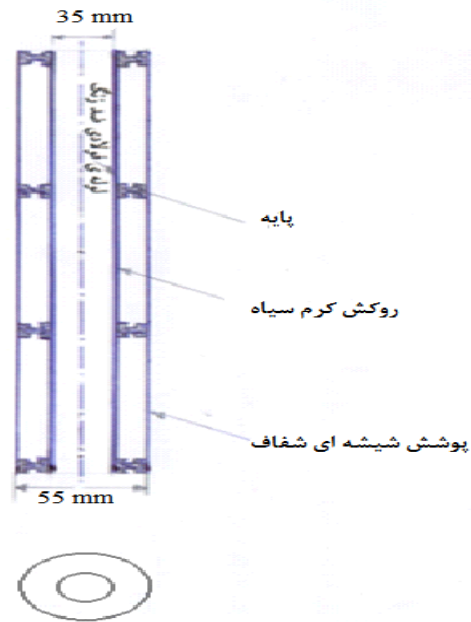
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{d_r}{2}}^{\frac{d_r}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (7)$$

D_r قطر لوله فولادی ریسور است و انحراف استاندارد توزیع انرژی از رابطه زیر بدست میاید:

$$d_r = \frac{D_r}{\sigma_y} \quad (8)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{A_a^2 (4\sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\psi_2}^2) (2 + \cos[\phi])}{12 \phi \sin \phi} \quad (9)$$

$\sigma_{\psi_1} = \sigma_{\psi_2}$ و برابر 0.25 و ϕ نصف زاویه دهانه برابر پنجاه درجه در این طرح میباشد. لذا مقدار انحراف استاندارد از رابطه فوق برابر $11/2$ میلی متر بدست میاید. همچنین مقدار



شکل (۵) لوله جاذب و پوشش شیشه ای

۲-۲- روش پیش بینی عملکرد

به منظور پیش بینی عملکرد کالکتور در اختیار داشتن شدت تابش خورشید روی سطح کالکتور در محل نصب ضروری است. برای این منظور از مدل (Hottel) استفاده شده [۲] که در آن شدت تابش خورشید در محل نصب برابر است با:

$$I_b = I_0 \tau_{atm} \quad (1)$$

در این رابطه I_0 شدت تابش خورشید در خارج از اتمسفر بوده و τ_{atm} از رابطه زیر بدست میاید:

$$\tau_{atm} = \alpha_0 + \alpha_1 \exp(-k \cos \alpha) \quad (2)$$

α_0 , α_1 , k صرفاً تابع ارتفاع و عرض جغرافیایی محل هستند و مقادیر آن ها برای این طرح بترتیب: 0.793 , 0.33 ، از همان مرجع به دست می آید.

و زاویه سمت الراس خورشیدی از رابطه زیر بدست میاید:

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta_s + \cos L \cos \delta_s \cos h_s \quad (3)$$

اولین عبارت سمت راست رابطه فوق اتلاف از طریق هدایت از پایه های نگهدارنده رسیور بوده و عبارت دوم اتلاف از طریق تابش از سطح خارجی لوله فولادی و عبارت آخر اتلاف از طریق هدایت توسط هوای محبوس بین سطح خارجی لوله و پوشش شیشه ای میباشد (در شرایطی که فضای مذکور خلا نشده باشد اگر فضای مذکور خلا شده باشد عبارت آخر سمت راست صفر خواهد شد) [۵]. تغییرات مقادیر عبارت فوق نسبت به زمان بسیار کم بوده همچنین جمع کل اتلافات در مقایسه با توان گرمایی جذب شده توسط رسیور بسیار کوچک میباشد لذا محاسبه آن بشکل تابع زمان ضرورت داشته و مقدار آن که در طول سال بین هفتاد تا صد وات تغییر میکند در محاسبات ثابت فرض میشود. (صد وات برای تابستان و هفتاد وات برای زمستان)

بدین ترتیب راندمان کلی کالکتور برابر است با:

$$\eta_c = q_u / (A_a I_b) = \eta_{opt} - q_L / (A_a I_b) \quad (13)$$

بنابراین میتوان راندمان اپتیکی راندمان کلی و نرخ جذب گرما توسط کالکتور را بر حسب زمان در طول یک روز آفتابی در هر ماه از سال رسم کرد و عملکرد آن را مشاهده کرد. متذکرا زاویه انحراف محور زمین تابع ماه از سال بوده و در طول سال متغیر است. متذکرا کلیه روابط از مرجع [۲] استخراج شد.

۳- نتایج

نتیجه ی این طرح عبارت است از کالکتور خورشیدی سهموی به طول ۴ متر و عرض دهانه ی ۲ متر که بر روی پایه ها در امتداد شمالی جنوبی مطابق شکل طوری نصب گردیده است که اولا شیبی حدود ۲۰ درجه نسبت به افق دارد تا تابش خورشید همواره به طور تقریباً عمودی به سطح دهانه ی آن وارد شود، ثانیاً امکان چرخش حول محور آن

d_r از تقسیم قطر لوله رسیور (۳۵ میلی متر) بر انحراف استاندارد برابر ۱/۵۵ بدست میاید. نهایتاً با محاسبه مقدار انتگرال به کمک تابع خطا مقدار دقیق δ برابر ۰/۸۹ محاسبه میشود این مقدار به مقدار انتخاب شده در طراحی بسیار نزدیک است.

عبارت (i) Atan در رابطه راندمان اپتیکی نشان دهنده کاهش موثر در سطح دهانه آفتابگیر بدلیل سایه، مانع و اتلاف تابش منعکس شده بدلیل بازتابش به فضای بیرون از کالکتور (جائی که دیگر لوله جاذب وجود ندارد) بوده و مقدار عددی A که تابع ابعاد هندسی کالکتور است در این طرح برابر ۰/۲۵ بدست میاید، با توجه به اینکه سایر پارامترهای اپتیکی در این طرح بقرار زیرند:

$$\rho_m = 0.9 \quad \tau_c = 0.9 \quad \alpha_r = 0.96$$

لذا رابطه ساده شده برای راندمان اپتیکی در این طرح عبارتست از:

$$\eta_{opt} = 0.6706 [1 - 0.25 (\tan i)] \cos i \quad (10)$$

بدین ترتیب در هر لحظه در طول روز آفتابی میتوان راندمان اپتیکی را بدست آورد، زیرا زاویه اصابت تابش خورشید به سطح کالکتور تابع زمان ظاهری خورشید است.

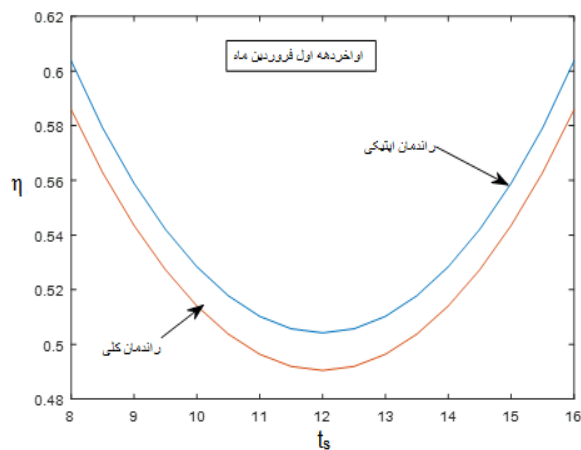
همچنین نرخ جذب گرمای خالص توسط کالکتور از رابطه زیر بعنوان تابعی از زمان ظاهری خورشیدی بدست میاید:

$$q_u = \eta_{opt} (A_a I_b) - q_L \quad (11)$$

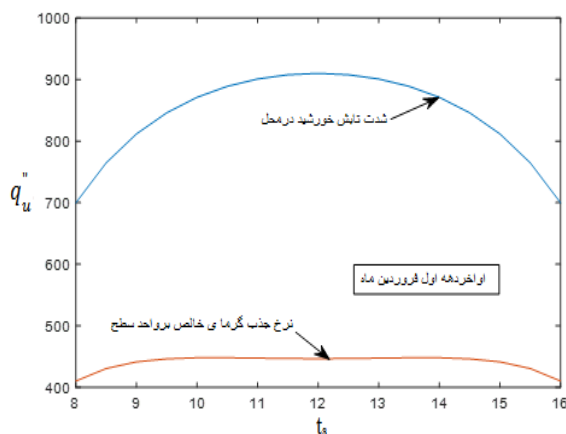
آخرین جمله سمت راست در عبارت فوق نرخ اتلاف گرما از رسیور بوده و از رابطه زیر بدست میاید:

$$q_L = \frac{(T_r - T_a)}{R_a} A_{cond} + \epsilon_r \sigma (T_r^4 - T_c^4) A_r + \frac{T_r - T_c}{\ln(r_o/r_i)} (2\pi kL) \quad (12)$$

کوچک باشد (روزهای اول بهار) در طول روز افتابی از صبح تا ظهر زاویه اصابت افزایش داشته و در ظهر به حداکثر میرسد لذا در این مدت راندمان کاهش میابد و در بعد از ظهر تا غروب زاویه اصابت کاهش یافته و موجب افزایش راندمان میگردد. همچنین تغییرات شدت تابش خورشید در محل در طول یک روز افتابی در دهه اول فروردین در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده میشود نرخ خالص گرمای جذب شده بر واحد سطح کالکتور در بخش عمده طول ساعات افتابی تقریباً ثابت است و دلیل آن تغییرات معکوس شدت تابش در محل و راندمان کلی کالکتور در طول روز است بطوریکه حاصلضرب آن ها یعنی نرخ خالص گرمای جذب شده در طول روز تقریباً ثابت میماند.



شکل (۷) تغییرات راندمان بر حسب زمان ظاهری خورشیدی



شکل (۸) تغییرات نرخ جذب گرمای بر واحد سطح

دو شکل زیر تکرار دو شکل فوق است با این تفاوت که برای اواخر دهه اول خردادماه رسم شده اند. همانطور که در

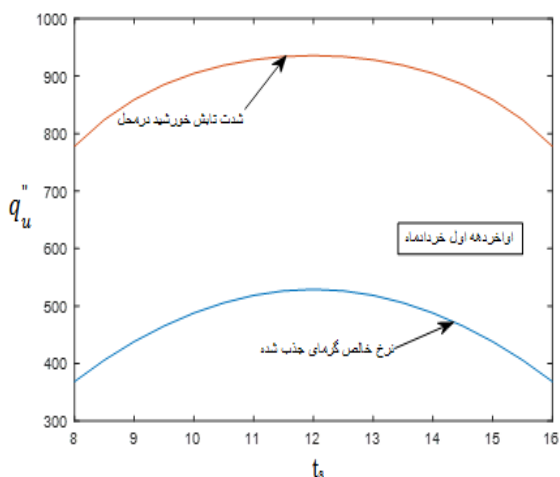
میسر است تا در طول روز با تغییر موضع خورشید در آسمان سطح دهانه ی ورودی همواره عمود بر تابش جهت تابش خورشید باشد. نیروی محرکه ی مورد نیاز برای حرکت چرخشی عبارت است از یک موتور - گریپکس DC که دور خروجی آن توسط گریپکس حلزونی به ۱۵ درجه در دقیقه کاهش می یابد. این تجهیزات روی صفحه ی فولادی جوش داده شده به پشت پایه ی کوتاه، نصب شده است. با تغییر موضع خورشید از طلوع تا غروب موتور DC به طور متناوب برای مدت های کوتاهی روشن شده و با چرخاندن کالکتور همواره سطح دهانه ی آن را عمود بر دسته اشعه ی خورشید نگه میدارد.



شکل (۶) تصویر سواره شده دستگاه

همچنین نتایج پیش بینی تئوریک عملکرد کالکتور در ادامه تشریح میگردد. تغییرات راندمان کالکتور و نرخ خالص جذب گرما توسط آن بر حسب زمان ظاهری خورشید در دو روز افتابی سال در اشکال زیر ارائه گردیده است.

همانطور که در شکل (۷) دیده میشود در طول روز از صبح تا ظهر راندمان کالکتور کاهش میابد و حداقل آن در ظهر اتفاق میافتد. دلیل این نحوه تغییرات اینست که راندمان کالکتور در طول روز در واقع تابع زاویه اصابت تابش خورشید به سطح آفتابگیر کالکتور بوده و با افزایش زاویه اصابت راندمان کاهش یافته و با کاهش آن راندمان افزایش میابد. در شرایطی که زاویه سمت الراس خورشیدی



شکل (۱۰) تغییرات نرخ جذب گرما بر واحد سطح کل

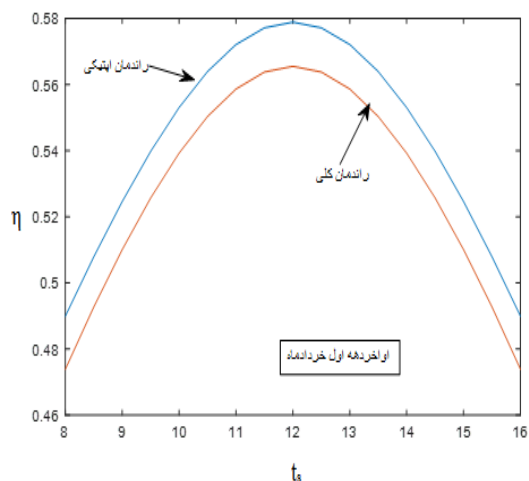
دلیل اصلی کمتر بودن راندمان از هفتاد درصد کوچک بودن پارامترهای اپتیکی کالکتور می باشد، چون همگی کمتر یا مساوی نه دهم هستند. در صورت افزایش این پارامترها به میزان پنج صدم راندمان می تواند به هشتاد درصد افزایش یابد.

۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به راندمان نسبتاً خوب دستگاه که با بهینه سازی قابل افزایش نیز می باشد و همچنین هزینه ی نسبتاً پایین بر واحد طول (حدوداً ۸۰۰,۰۰۰ تومان برای عرض دهانه ی ۲ متر) این روش ساخت کالکتور سهموی خطی قابل رقابت با سایر روش ها بوده بلکه بر سایر روش ها ارجحیت دارد. از مزایای این روش نسبت به سایر روش ها، فلزی بودن سطح منعکس کننده (ورق فولادی آینه ای) و یکپارچه بودن آن می باشد که باعث می شود سطح سهمیگون مورد نیاز کامل تر و دقیق تر ایجاد گردد. همچنین برای ایجاد این سطح سهمیگون از تعدادی تکیه گاه کمانی از جنس تفلون استفاده شده که فقط دهانه ی آن به شکل سهمی فرم داده شده و ورق فولادی مسطح با اندک فشار روی تکیه گاه ها نشسته و شکل سهمیگون را به خود می گیرد و توسط پیچ و واشر به بدنه محکم شده و شکل خود را حفظ می کند. هر تکیه گاه خود در دهانه سازه ۷ شکل نشسته و محکم می

شکل (۹) دیده میشود، تغییرات راندمان اپتیکی و کلی در طول یک روز افتابی در تاریخ فوق الذکر نشان داده شده است. در این حالت چون زاویه سمت الراس خورشیدی بزرگ است و تابش خورشید نزدیک به امتداد عمود بر افق به سطح آفتابگیر وارد میشود، لذا زاویه اصابت در طول روز از صبح تا ظهر کاهش میابد و موجب افزایش راندمان میگردد و در بعد از ظهر تا غروب با افزایش زاویه اصابت راندمان کاهش میابد.

در این حالت با توجه به شکل (۱۰) نرخ خالص جذب گرما بر واحد سطح از صبح تا ظهر افزایش یافته و در ظهر به حداکثر میرسد. سپس در ساعات بعد از ظهر کاهش میابد. دلیل این نوع تغییرات تغییرات همراستای راندمان و شدت تابش خورشید در طول روز است لذا حاصلضرب آن ها یعنی نرخ خالص جذب گرما بر واحد سطح در طول روز تغییراتی هم جهت با راندمان یا شدت تابش خورشید خواهد داشت.



شکل (۹) تغییرات راندمان بر حسب زمان ظاهری خورشیدی

I_o	شدت تابش خورشید در خارج از اتمسفر (W/m^2)
I_b	شدت تابش خورشید روی سطح کالکتور (W/m^2)
r_i	شعاع خارجی لوله رسیور (mm)
r_o	شعاع داخلی پوشش شیشه ای لوله جاذب (mm)
ρ_m	ضریب انعکاس سطح منعکس کننده
	ضریب به دام اندازی تابش منعکس شده از سطح آینه
γ	توسط رسیور
	ضریب جذب سطح خارجی لوله رسیور در برابر تابش
α_r	خورشید
ε_r	ضریب صدور سطح خارجی لوله جاذب
τ_c	ضریب عبور پوشش شفاف لوله جاذب
τ_{atm}	ضریب عبور تابش خورشید از اتمسفر
k	ضریب هدایت هوای محبوس (W/mk)
l	طول لوله جاذب (m)
L	عرض جغرافیایی محل نصب کالکتور ($^\circ$)
f	فاصله کانونی سهمی (mm)
D_r	قطر لوله رسیور (mm)
A_a	مساحت سطح دهانه کالکتور (m^2)
	مقاومت در برابر هدایت از لوله جاذب به پایه های
R_a	نگهدارنده (k/w)
q_L	نرخ اتلاف گرما از رسیور (w)
q_u	نرخ جذب گرمای خالص توسط کالکتور (w)
	نرخ جذب گرمای خالص توسط کالکتور بر واحد سطح
q_u''	(w/m^2)
	نصف زاویه دهانه سهمی (زاویه بین خطوط مماس بر سهمی
φ	در دو انتها) ($^\circ$)
σ_y	واریانس توزیع شدت تابش خورشید (mm)

گردد. این روش برای ایجاد سطح سهمیگون ارزاتر و سریعتر از روش های مرسوم می باشد [۶,۷].

۵- تشکر و قدردانی

با تشکر از معاونت پژوهش و فن آوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر که کلیه اعتبار مالی این طرح پژوهشی را تامین کردند، و قدردانی صمیمانه از آقایان مهرداد آقاچانی، حسین اکبری درچه، و محسن جعفری ولدانی که در ساخت و اجرای طرح پژوهشی مشارکت فعال داشتند.

۶- فهرست علائم

y_f	ارتفاع بالاترین نقطه روی سهمی از محور افقی (mm)
	انحراف استاندارد توزیع تابش خورشید (چون خورشید
$\sigma_{\psi 2}$	منبع تابشی نقطه ای نیست)
	انحراف استاندارد توزیع شدت تابش خورشید انعکاس یافته
$\sigma_{\psi 1}$	از روی سطح
σ	ثابت استفان بولتزمن (W/m^2k^4)
T_c	دمای سطح پوشش رسیور ($^\circ C$)
T_a	دمای هوای محیط اطراف
η_o	راندمان اپتیکی کالکتور
η_c	راندمان کلی کالکتور
	زاویه اصابت تابش خورشیدی (زاویه بین دسته اشعه
i	خورشیدی و خط عمود بر سطح کالکتور) (rad)
δ_s	زاویه انحراف محور کره زمین (rad)
h_s	زاویه ساعت خورشیدی (rad)
α	زاویه سمت الراس خورشیدی (rad)
β	زاویه شیب کالکتور نسبت به افق محل نصب (rad)
t_s	زمان ظاهری خورشیدی (hr)
A_r	سطح خارجی لوله جاذب (رسیور) (m^2)
A_{cond}	سطح موثر انتقال گرما از طریق پایه ها (m^2)

مراجع:

[1] Singal R.K., Non-Conventional Energy Resources, S. K. Kataria & Sons, 2009, pp. 117-20

[۲] Goswami D.Y., Kreith F., Kreider J.F., Principles of Solar Engineering, Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 1999, pp. 188, 316.

[3] Anderson E.E., Fundamentals of Solar Energy Conversion, Addison-Wesley, 1983, pp. 98-100

[۴] لاری ح، آزر م د، طراحی و ساخت مجموعه متمرکز کننده خورشیدی سهموی باز، دومین همایش ملی انرژی، تهران، کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت امور برق و انرژی وزارت نیرو، ۱۳۷۸.

http://www.civilica.com/Paper-NEC02-NEC02_089.html

[۵] Bergman T.L., Incropera F.P., Introduction to Heat Transfer, Wiley, 2011, pp.110-20

[6] توکلی قینانی ت، قاری زاده س س، مددی اورگانی و، طراحی ساخت و مطالعه آزمایشگاهی یک دستگاه آبگرمکن خورشیدی با جمع کننده سهموی، سومین همایش ملی تحقیقات نوین در شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر، ۱۳۹۰.

http://www.civilica.com/Paper-CMRCE03-CMRCE03_306.html

[7] روضاتی م، آریایی اصل الف، طراحی و مطالعه متمرکز کننده های خورشیدی. دانشکده علوم پایه. دانشگاه گیلان، ۱۳۹۳.