

## بهینه سازی طرح و سیستم کنترل کلکتورهای سهموی خطی مورد استفاده در سرمایش ساختمان خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی

محمد امین زاده<sup>۱</sup>، محمد امینی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا حقگو<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی انرژی های تجدیدپذیر، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی پژوهشگاه انرژی پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

۳- مربی و عضو هیئت علمی پژوهشگاه انرژی پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج

\* کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، صندوق پستی: ۳۱۷۸۷-۳۱۶، mohammadaminy@merc.ac.ir

### چکیده

کاربری انرژی خورشیدی به منظور تامین آب گرم مصرفی، گرمایش و سرمایش فضاها در ایران در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، دو دستگاه چیلر جذبی خورشیدی به ظرفیت هر کدام ۲۰ تن تبرید که برای ساختمان خورشیدی با زیربنای تقریباً ۱۴۰۰ متر مربع در پژوهشگاه مواد و انرژی واقع در مشکین دشت کرج طراحی شده بود، مورد بهینه سازی قرار گرفت و سیستم های کنترلی برای بهبود عملکرد سیستم به آن اضافه گردید. این پژوهش نشان می دهد که سازگارترین نوع چیلر جذبی خورشیدی، چیلر جذبی تک اثره با تغذیه آبگرم و مناسب ترین گردآور خورشیدی جهت کاربری سرمایش، کلکتورهای سهموی خطی می باشند. توان ژنراتور هر کدام از چیلرهای جذبی تک اثره ۱۰۸ کیلووات می باشد که با استفاده از ۲۶۲ متر مربع کلکتور سهموی خطی مدل PTC 3000 ساخت شرکت سولیتیم ترکیه، توان مورد نیاز تامین خواهد شد. دو دستگاه برج خنک کن و مخزن ذخیره به ظرفیت ۲۸۰۰۰ لیتر برای سامانه در نظر گرفته شده است. با محاسبات انجام شده، این سامانه توانایی برطرف کردن نیاز سامانه سرمایش برای ۶ تا ۸ ساعت در اوج فصل گرما را دارد. کلکتورهای طراحی شده می توانند راندمان حرارتی تا ۶۲ درصد داشته باشند.

کلیدواژگان: تهویه مطبوع، کلکتور سهموی خطی، انرژی خورشیدی، چیلر، سیستم جذبی تک اثره لیتیم بروماید.

## Optimized design and control system of linear parabolic trough collectors used in solar cooling at Material & Energy Research Center (MERC)

Mohammad Aminzadeh<sup>1</sup>, Mohammad Aminy<sup>1\*</sup>, Hamidreza Haghgou<sup>1</sup>

1- Department of energy, Material & Energy Research center, Karaj, Iran.

\* P.O.B. 316-31787, Karaj, Iran, mohammadaminy@merc.ac.ir.

Received: 14 November 2016

Accepted: 28 February 2017

### Abstract

Using solar energy to provide hot water, space heating and cooling in Iran has attracted much attention in recent decade. In this article, two solar absorption chillers were optimized with the capacity of 20 tons of refrigeration for each one that has been designed for solar building at Material and Energy Research Center (MERC) in Meshkindasht with the area of approximately 1400 square meters and control systems were added to improve system performance. This study has shown that most adaptable solar absorption chillers are single effect chillers with hot water and the most appropriate collectors are linear parabolic trough collectors for solar cooling. Each of the generators of single-effect absorption chillers consume 108 kW power which power requirement will be provided by using 262 square meters of PTC 3000 linear parabolic collectors from Solitem Turkey company. Two cooling towers and a storage tank were designed with a capacity of 28,000 liters for the systems. Based on calculations, this system can meet the cooling system needs for 6 to 8 hours in the peak of the hot season. Designed collectors can supply thermal efficiency up to 62%

**Keywords:** Air conditioning, Parabolic trough collector, Solar energy, Lithium bromide single effect chiller.



## ۱- مقدمه

در کشور ما حدود ۴۰ درصد سوخت مصرفی به بخش ساختمان اختصاص داده شده که در کنار هزینه‌های بالای آن برای مصرف‌کننده، با خطر رو به اتمام بودن منابع و آلودگی محیط‌زیست همراه است که این مهم استفاده از سرچشمه‌های تجدید پذیر انرژی را واجب می‌سازد [۱]. از آنجاکه استفاده از این انرژی‌های تجدید پذیر منجر به تولید مقادیر بسیار ناچیزی و در برخی موارد، عدم تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود، لذا یکی از سوخت‌هایی که به‌زودی در دنیا رتبه اول مصرف را به خود اختصاص می‌دهد، انرژی خورشیدی است.

موارد مؤثر در مصرف انرژی یک ساختمان به نوع کاربرد ساختمان، شرایط اقلیمی، ساختار ساختمان و تأسیسات مکانیکی و الکتریکی ساختمان بستگی دارد اما در نهایت مهم‌ترین و مؤثرترین عوامل مصرف انرژی مربوط به تهیه آب گرم، سرمایش، گرمایش و روشنایی می‌شود. بر همین اساس در پژوهشگاه مواد و انرژی، پروژه‌ای تحت عنوان ساختمان خورشیدی به‌منظور ارائه خدمات دانشجویی و آموزشی تعریف گردید تا طراحی‌های لازم جزئی و برآورد هزینه‌های آن برای حدود ۱۴۰۰ مترمربع زیربنا به دست آید. مهم‌ترین هدف این پروژه، ساختمانی است که بخش بزرگی از انرژی خود را از طریق انرژی‌های تجدید پذیر تأمین کند. با توجه به اینکه بخش بزرگی از انرژی الکتریکی مصرفی در فصل تابستان به سرمایش اماکن مسکونی و اداری اختصاص دارد و این مسئله منجر به بحران انرژی شده است، لذا چیلرهای خورشیدی می‌توانند به جایگزین مناسبی برای کولرهای آبی و گازی، که مصرف برق بالایی دارند، تبدیل شوند. چیلر جذبی خورشیدی در سال ۱۹۷۴ توسط شرکت یازکی ژاپن طراحی شده است و از آن سال استفاده از این نوع چیلرها گسترش زیادی یافته است [۲].

این سیکل، گرمای موردنیاز ژنراتور از انرژی خورشیدی تأمین می‌گردد. در چیلرهای جذبی اولیه از آمونیاک به‌عنوان ماده جاذب استفاده می‌شد که به علت سمی و خورنده بودن در سال‌های بعد، لیتیوم برومید به‌عنوان جایگزینی برای آن مطرح شد ولی مشکل عمده لیتیوم برومید، تشکیل بلور در آن است که در اثر غلظت خیلی زیاد یا افت دمای شدید محلول ممکن است پیش آید. میرد سیستم‌های لیتیوم برومید، آب به عنوان میرد در دمای پایین‌تر از صفر درجه سانتی گراد منجمد می‌شود و مسیر جریان را مسدود می‌کند. لذا کاربرد آن‌ها مخصوص دماهای بالای صفر است. چیلرهای جذبی را می‌توان از لحاظ تعداد ژنراتورهای آن‌ها نیز تقسیم‌بندی نمود که به دودسته‌ی کلی چیلرهای تک اثره و چیلرهای جذبی دو اثره تقسیم می‌شوند که تفاوت آن‌ها حاصل از تفاوت تعداد ژنراتورهای آن‌ها است. همچنین چیلرهای جذبی تک اثره را نیز می‌توان بر اساس چگونگی عملکرد ژنراتورهای آن‌ها به ۳ دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد. در دسته‌ی اول که به ژنراتورهای شعله مستقیم موسوم‌اند، شعله مستقیماً میرد درون ژنراتور را گرم می‌کند و در دسته‌ی دوم آب داغ یا بخار وارد ژنراتور شده و عامل جداسازی جاذب موجود درون سیستم می‌شود و در دسته‌ی آخر که به چیلرهای جذبی تک اثره با تغذیه آب گرم موسوم‌اند، آب گرم حدود ۸۸ درجه سانتی گراد وارد ژنراتور شده و فرایند جداسازی جاذب و میرد (لیتیوم برومید و آب) را انجام می‌دهد. فناوری تبرید جذبی روشی عالی برای تهویه مطبوع مرکزی در تأسیساتی است که ظرفیت دیگ اضافی دارند و می‌توانند بخار یا آب داغ موردنیاز برای راه‌اندازی چیلر را تأمین نمایند. کاربرد چیلرهای تک اثره در حال کاهش است ولی به دلیل اینکه محدوده دمایی کارکرد ژنراتور آن‌ها به‌راحتی با کلکتورهای خورشیدی قابل تأمین است بنابراین مصارف آن‌ها برای سرمایش ساختمان‌های مسکونی و اداری کوچک در حال افزایش است [۴].

## ۲- طرح سیستم

در این مقاله هدف طراحی یک سیستم خورشیدی برای یک ساختمان اداری با زیربنای حدوداً ۱۴۰۰ مترمربع و با فضای مفید تهویه شده‌ی ۹۸۴ مترمربع در پژوهشگاه مواد و انرژی در مشکین‌دشت کرج است. سیستم سرمایش این مجموعه از ۷ صبح یعنی سی دقیقه قبل از آغاز کار اداری و تا ساعت ۱۹ فعال خواهد بود. مدت‌زمان کارکرد سیستم برای ۵ ماه از سال طی روزهای ۱۵ اردیبهشت تا ۱۵ مهرماه در نظر گرفته می‌شود [۳]. با توجه به داده‌های ناسا شرایط ذیل برای مشکین‌دشت در نظر گرفته می‌شود:

۱- عرض جغرافیایی  $\phi$ : 35/45 درجه شمالی

۲- طول جغرافیایی (L): 50/56 درجه شرقی

۳- ارتفاع از سطح دریا (E): ۱۲۱۹ متر

## ۳- اجزای سیستم

### ۳-۱- انتخاب نوع سیستم سرمایشی

سامانه‌های سرمایشی موجود در بازار عبارت‌اند از: چیلرهای تراکمی، چیلرهای جذب حجمی، چیلرهای جذب سطحی، سیستم‌های جامد و مایع دیسکانت و چرخه سرمایشی اچکتور. از بین این سیستم‌ها، سیستم‌های جذبی به دلیل قابلیت اطمینان و راندمان بالاتر، بیشتر موردتوجه هستند. همچنین سیستم‌های جذبی برای ظرفیت‌های مختلف، با قیمت پایین‌تری در بازار عرضه شده‌اند. سیکل تبرید جذبی اساس کار چیلرهای خورشیدی است. در

### ۳-۲- انتخاب نوع سیستم خورشیدی

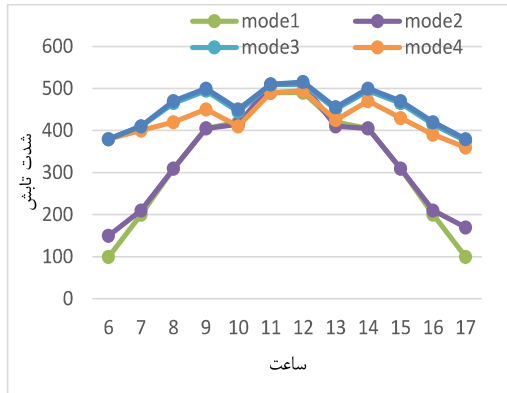
جهت انتخاب کلکتور موردنظر به جدول ۱ رجوع می‌شود:

COP پایین یک ضعف برای سیستم تک اثره است که منجر به سطح زیاد کلکتور می‌شود و برای ساختمان‌هایی که فضای کمی در بام دارند می‌تواند ایجاد مشکل نماید. طبق کاتالوگ، ژنراتور این چیلرها به آب گرم ۸۸ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد. این نکته قابل توجه است که می‌توان برای تأمین این دما از کلکتورهای لوله خلأ استفاده نمود اما پایداری دما در این محدوده و راندمان بالاتر کاری باعث می‌شود تا اولویت با کلکتور سهموی خطی باشد. لازم به ذکر است که کلکتور لوله خلأ به دلیل نداشتن سیستم ردیابی دارای هزینه پایین‌تری است. همچنین در محیط‌هایی که میزان ابرناکی یا غبار هوا زیاد باشد به دلیل دریافت بهتر تابش دیفیوز، عملکرد بهتری نسبت به سایر کلکتورها خواهند داشت.

برای تعیین جهت حرکت کلکتور پنج حالت حرکت را در نظر می‌گیریم. برای سطح‌های افقی، زاویه برخورد برابر زاویه اوج خورشیدی  $\theta_z$  است. مقدار آن باید بین صفر و ۹۰ درجه، هنگامی که خورشید در بالای افق است، باشد. برای این حالت،  $\beta = 0$  است و معادله به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (1)$$





شکل ۲ تابش جذب شده در حالت های مختلف در کرج

شکل ۱، تابش جذب شده اندازه گیری شده را برای پنج حالت حرکت در ماه جولای نشان می دهد. ملاحظه می شود بهترین حالت برای حالت پنجم یعنی سیستم پیگرد بر اساس قرار گرفتن شمالی- جنوبی کلکتور و حرکت در جهت شرق به غرب است.

### ۳-۳- برآورد بار سرمایشی توسط نرم افزار

برآورد بار سرمایشی این پروژه توسط نرم افزار Carrier (Hap۴,۲ a) که یکی از رایج ترین نرم افزارهای محاسبه، شبیه سازی انرژی، بار حرارتی و برودتی ساختمان ها می باشد، صورت گرفته است. از خروجی نرم افزار، بار برودتی برابر با ۳۱,۹ تن تبرید به دست آمد که با احتساب ضریب اطمینان ۱۰ درصد، به ۳۵ تن تبرید برای ۹۸۴ مترمربع فضای مفید تهیه شونده، تغییر می کند. طبق محاسبات، بیشینه سرمایش، در روز ۱۶ جولای مورد نیاز می باشد.

### ۴-۳- طراحی دستگاه سرما ساز

در قسمت های قبل اشاره شد که سیستم مناسب برای تلفیق سیستم خورشیدی و سرمایشی، نوعی چیلر جذبی تک اثره با تغذیه آب گرم است که دمای آب ورودی از سیستم خورشیدی به این چیلرها حدود ۸۸ درجه سانتی گراد بوده و آب از ژنراتور با اختلاف دمای حدود ۶ درجه سانتی گراد خارج شده و به سمت منبع ذخیره باز می گردد.

جهت محاسبه سطح مورد نیاز کلکتور خورشیدی لازم است که قدرت خروجی از کلکتور و توان مورد نیاز ژنراتور را محاسبه نموده و از تقسیم این دو عدد، مساحت مورد نیاز کلکتور محاسبه می شود. لازم به ذکر است که چیلرهای جذبی از نوع چیلرهای آب گرم ساخت شرکت یازاکی ژاپن، برج خنک کننده ساخت شرکت بادران تهیه صنعت و کلکتورهای خورشیدی ساخت شرکت سولیتیم ترکیه انتخاب گردیده است.

جهت انجام محاسبات به این صورت عمل می کنیم:

بالانس حرارتی چیلر جذبی به صورت رابطه (۵) است:

$$Q_g + Q_e = Q_c \quad (5)$$

$Q_g$ : گرمای ورودی به ژنراتور برحسب کیلووات

$Q_e$ : ظرفیت سرمایشی برحسب کیلووات :

$Q_c$ : گرمای خروجی از برج خنک کننده برحسب کیلووات

$$Q_g = HIF \times HMFCF \times RHI \quad (6)$$

$$Q_e = CCF \times HMFCF \times RCC \quad (7)$$

جدول ۱ انواع کلکتورهای ثابت و متحرک.

نوع حرکت	نوع کلکتور	نسبت تمرکز	محدوده دمای گزارش شده
ثابت	صفحه تخت	۱	۳۰-۸۰
	لوله خلأ	۱	۵۰-۲۰۰
	سهلوی مرکب	۱-۵	۶۰-۲۴۰
حرکت حول یک محور	خطی فونل	۱۰-۴۰	۶۰-۲۵۰
	سهلوی خطی	۱۵-۴۵	۶۰-۳۰۰
	استوانه ای خطی	۱۰-۵۰	۶۰-۳۰۰
حرکت حول دو محور	بشقابی سهلوی	۱۰۰-۱۰۰	۱۵۰-۱۰۰
	چرخ آبنمای دورانی	۱۵۰-۱۰۰	۲۰۰-۱۵۰

در حالت اول: برای یک صفحه دارای دوران حول محور افقی شرقی- غربی با یک تنظیم روزانه، به طوری که تابش مستقیم در ظهر هرروز، عمود به سطح مورد نظر باشد، خواهیم داشت:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos \omega \quad (2)$$

در حالت دوم: برای یک صفحه با دوران حول یک محور افقی شرقی- غربی با تنظیم پیوسته به منظور کمینه کردن زاویه برخورد داریم:

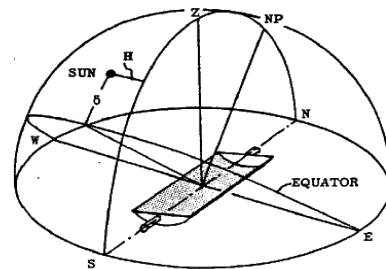
$$\cos \theta = (1 - \cos 2\delta \sin 2\omega)^{1/2} \quad (3)$$

در حالت سوم: برای یک صفحه دارای دوران حول محور افقی شمالی- جنوبی با زاویه سمت  $\gamma = 90$

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos \beta + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \quad (4)$$

در حالت چهارم: در این حالت که قرارگیری قطبی نام دارد  $\theta = \delta$  است. محور گردش سیستم به سمت قطب جهت گیری شده است. حرکت فصلی زاویه میل خورشید را ۲۳,۵ درجه شمال و جنوب جهت عمود بر موقعیت ظهر آینه قرار دارد.

در حالت پنجم: در این حالت که حالت پیگرد است، سیستم پیگرد بر اساس قرار گرفتن شمالی- جنوبی کلکتور و حرکت در جهت شرق به غرب است که این حالت نسبت به حالات دیگر دارای بازدهی بیشتری است. در این حالت  $\theta = 0$  است که در شکل زیر این حالت نشان داده شده است:



شکل ۱ حالت پنجم ردیابی خورشید



جدول ۲ داده‌های ورودی و مشخصات چیلر.			در این روابط HIF ضریب حرارت ورودی، HMFCF ضریب تصحیح جریان، RHI نرخ حرارت ورودی، CCF ضریب ظرفیت سرمایشی و RCC نرخ ظرفیت سرمایشی است که از کاتالوگ شرکت سازنده و برحسب بعضی متغیرها و نمودارها مشخص می‌شوند. با محاسبه $Q_e$ و $Q_g$ از روابط (۶) و (۷) می‌توان $Q_c$ را از رابطه (۵) محاسبه کرد.
گرمای ورودی به ژنراتور	۱۹۵ °F	۹۰.۵ °C	$\Delta T = Qx / (0.5 \times Qa)$ (۸)
اختلاف دمای سیال گرم کننده	۷۶.۱ GPM	۴.۸ Lit/Sec	
ظرفیت سرمایشی	۸۷.۸ °F	۳۱ °C	جهت محاسبه اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال جریانی در هر قسمت از سیستم از رابطه (۸) می‌توان استفاده کرد که در آن $\Delta T$ اختلاف دما برحسب فارنهایت، $Qx$ قابل جابجایی با تمام پارامترهای حرارتی برج خنک‌کن، ژنراتور و ظرفیت سرمایشی و $Qa$ نرخ جریان سیال است. با توجه به دیدگاه مهندسی و حفظ ضریب اطمینان جهت راهبری و تعمیرات سیستم منطقی است که ۲ دستگاه چیلر جذبی ۲۰ تن تبرید مدل WFC-SH20 شرکت یازاکی انتخاب گردد.
اختلاف دمای سیال سرد شونده	۱۶۱.۷ GPM	۱۰.۱۸ Lit/Sec	
گرمای خروجی از برج خنک‌کننده	۴۴.۶ °F	۷ °C	
اختلاف دمای آب برج خنک‌کن	۱۳۱ °F	۵۵ °C	
گرمای ورودی به ژنراتور	۴۸.۴ GPM	۱.۰۵ Lit/Sec	

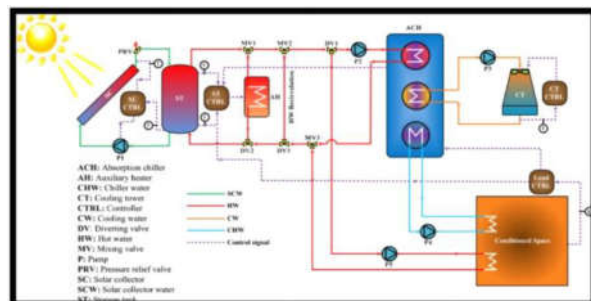
جدول ۵ داده‌های خروجی سیستم

$Q_g$	370.22 MBTUH	108.56B KW
Heat Medium $\Delta T$	9.73 F	
$Q_e$	254.4 MBTUH	74.6 KW
Chilled water $\Delta T$	10.51 F	
$Q_c$	624.62 MBTUH	183.17 KW
Cooling water $\Delta T$	7.72 F	

### ۳-۵ سیستم‌های کنترلی

آرایه کلکتورهای خورشیدی به‌صورت هیدرولیکی به یک مخزن ذخیره چندلایه متصل است. در طول روز، پمپ لوپ خورشیدی ( $P_1$ ) از طریق یک واپایشگر نسبی فعال می‌شود وقتی که (۱) میزان تابش خورشیدی کلی بیشتر از  $150 \text{ W/m}^2$  باشد یا (۲) میزان اختلاف دما بین خروجی کلکتور و پایین مخزن ذخیره، بیش از ۳ کلون شود. پمپ، آب را از پایین منبع ذخیره به سمت کلکتور هدایت می‌کند و دوباره به بالای مخزن باز می‌گرداند یک درایو دور متغیر روی پمپ خورشیدی وجود دارد که با تنظیم دبی آب عبوری، میزان دمای خروجی از کلکتور را کمی بالاتر از دمای موردنیاز گرمایش مخزن یا سیستم نگاه می‌دارد. این استراتژی مانع کاهش شدید دما در مخزن با توجه به بار بالای مصرفی در ساختمان و یا کاهش شدت تابش می‌شود [۶].

اگر میزان دبی عبوری از ۱۰ درصد دبی اسمی پمپ کمتر شود، واپایشگر، پمپ را خاموش می‌کند [۷]. به‌منظور جلوگیری از افزایش دمای آب در مدار، یک شیر اطمینان در مدار کلکتور خورشیدی قرار می‌گیرد. وقتی دمای پایین مخزن برابر یا بالاتر از دمای خروجی کلکتور باشد کلکتور، پمپ را خاموش می‌کند. چندلایه بودن مخزن ذخیره باعث می‌شود که آب با دمای پایین‌تر به کلکتور فرستاده شود. در نتیجه، کارایی کلکتور خورشیدی بیشینه شود. در طول فصل سرما، وقتی که دمای ۷۵٪ بالایی مخزن ذخیره بیشتر از دمای موردنیاز چیلر است، آب گرم از بالای مخزن توسط پمپ ( $P_2$ ) به ژنراتور فرستاده می‌شود. زمانی که دمای بالای منبع از دمای موردنیاز ژنراتور کمتر شود، هیتر کمکی روشن شده و منبع ذخیره را با دبی پس می‌کند. در این حین (وقتی هیتر گازی روشن است) دمای آب داخل مخزن می‌تواند توسط کلکتور خورشیدی بالا رود. موازی بودن هیتر کمکی با مخزن ذخیره باعث می‌شود

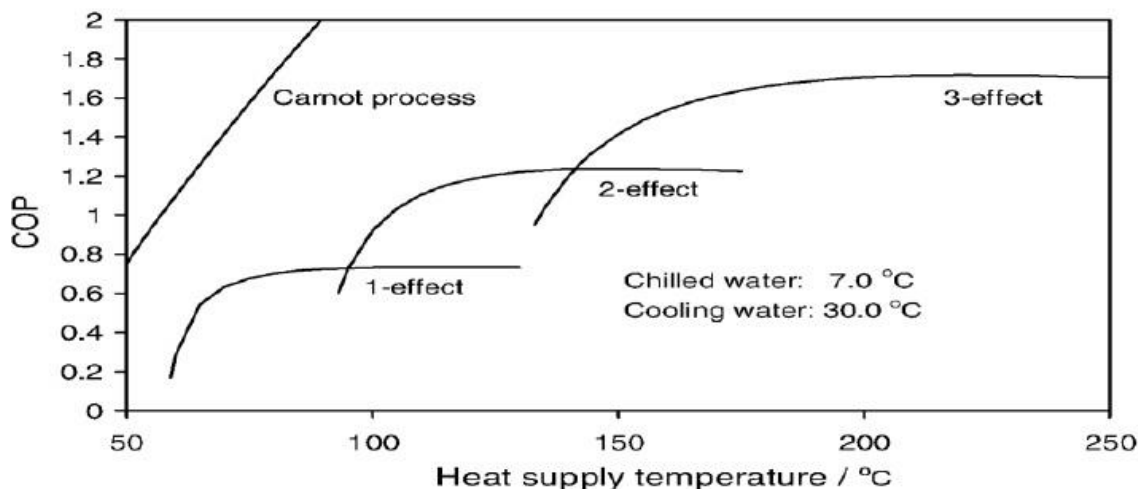


شکل ۳ شماتیک کلی سیستم سرمایش

COP چیلرهای تک اثره، در حدود ۰.۷ است. همان‌طور که گفته شد، ژنراتور این چیلرها نیاز به آب گرم ۸۸ درجه سانتی‌گراد دارد که تأمین این دما در نقطه کانونی کلکتورهای سهموی خطی با قابلیت اطمینان بالا به‌راحتی انجام می‌پذیرد. به همین دلیل در این مقاله به امکان‌سنجی استفاده از کلکتورهای سهموی خطی برای تأمین آب گرم پرداخته شده است. عملکرد حرارتی کلکتورهای متمرکز بسیار تابع تابش مستقیم عمود بر کلکتور است. بنابراین، پارامتر تابش مستقیم عمود، برای ما ملاک عمل است. طبق مرجع [۵] کلکتورهای متمرکز مانند کلکتورهای سهموی خطی فقط زمانی که نسبت تابش مستقیم به کل بیش از ۶۰ درصد باشد، جوابگوی نیاز سیستم‌های سرمایشی مدرن هستند. در نمودار زیر بازده چیلرها با توجه به دمای منبع آب گرم آن‌ها آورده شده است که با توجه به آن می‌توان مشاهده کرد که بازده سیستم‌های بخار و چند اثره، بسیار بالاتر از سیستم‌های آب گرم تک اثره است ولی با توجه به دمای کارکرد بسیار بالای آن‌ها و کمبود ساعت‌های تابش زیاد، برای تأمین این دما، افت راندمان کلی سیستم و هزینه‌های بسیار سنگین آن‌ها، بررسی و محاسبات بر روی چیلرهای آب گرم انجام گرفته است.

با توجه به اطلاعات مربوط به چیلرهای جذبی که در جدول ۲ آمده است و همچنین با توجه به نمودارهای موجود در کاتالوگ سازنده چیلر، گرمای ورودی به ژنراتور، ظرفیت سرمایشی و گرمای خروجی از برج خنک‌کننده و همچنین اختلاف دماها با استفاده از روابط (۵) تا (۸)، محاسبه گردید. نتایج محاسبات در جدول ۴ موجود می‌باشند.





شکل ۴ بازده چیلرها با توجه به دمای منبع آب گرم

که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه توضیح داده خواهد شد باهم ترکیب و حل شده‌اند تا مقادیر و پارامترهای حرارتی، محاسبه شوند. در ابتدا به مقدار تابش موجود در محل که در دسترس قرار داشت رجوع شده است. داده‌ها از سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۰ به صورت پیاپی توسط دستگاه پیرانومتر مدل CM22 دارای نشانگر اطلاعات با ۲ کانال و حسگر میزان روشنایی روز مدل BD-300 دارای تحلیلگر اطلاعات با ۴ کانال، واقع در سایت خورشیدی پژوهشگاه مواد و انرژی ثبت شده است. در قسمت زیر نمودارهای تابش ماهانه در طول یک سال برای سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در مشکین دشت کرج استان البرز آورده شده که در آن‌ها مقادیر تابش متوسط، بیشینه و کمینه همراه به تفکیک قید گردیده است.

به این منظور لازم است به اطلاعات اندازه‌گیری شده تابش روی سطح افق در محل موردنظر جهت روز و ساعت موردنظر رجوع کرد. در مورد این مقاله روز و ساعت موردنظر، روز ۱۶ جولای در بین ساعات ۱۵ الی ۱۶ است. در این صورت خواهیم داشت:

$$\delta = 21.2 \text{ و } n = 197$$

$n$  شماره روز موردنظر و  $\delta$  زاویه انحراف برای روز مربوطه است که از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\delta = 23/45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (11)$$

با توجه به اینکه کلکتور به سمت جنوب قرار می‌گیرد پس زاویه سمت الراس برابر صفر است یعنی  $\gamma = 0$ . برای محاسبه زاویه برخورد از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \omega \cos \delta + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (12)$$

برای محاسبه  $\omega$  یعنی زاویه غروب خورشیدی باید ابتدا ساعت خورشیدی محاسبه شود:

$$\text{Solar time} - \text{standard time} = 4 (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (13)$$

که در این رابطه  $L_{st}$  مدار استاندارد منطقه و  $L_{loc}$  مدار محلی منطقه است. پارامتر  $E$  نیز از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

که هیچ‌گاه هیتر برای تأمین گرمای مخزن ذخیره به کار نرود. در این صورت جذب بیشتر گرما توسط کلکتور خورشیدی را تضمین می‌شود [۸]. این رویکرد موجب طولانی شدن دوره عملکرد حرارتی با خورشید می‌شود که تعداد دفعات روشن و خاموش شدن سویچ بین مخزن ذخیره و هیتر کمکی را کاهش می‌دهد. یک حسگر نسبی در مدار برج خنک‌کن، سرعت فن برج را تنظیم می‌کند به نحوی که دمای آب برگشتی از برج در محدوده قابل قبول شرکت سازنده چیلر باشد.

### ۳-۶ هیتر کمکی

یک هیتر کمکی برای تأمین حرارت موردنیاز چیلر یا کویل حرارتی هنگامی که انرژی خورشیدی موجود نیست استفاده می‌شود. با به کار بردن موازنه انرژی برای مشعل گازی کمکی، دمای آب در خروج از هیتر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{AH,out} = T_{AH,in} + \frac{Q_{AH} - Q_{loss,AH}}{m_{w,AH} c_{p,w}} \quad (9)$$

که در آن  $Q_{loss,AH}$  نشان‌دهنده تلفات حرارتی در مشعل است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{loss,AH} = UA_{AH}(T_{av} - T_a) + (1 - \eta_{AH})Q_{AH} \quad (10)$$

که در آن  $UA_{AH}$  اشاره به تلفات کلی حرارتی بین مشعل و محیط دارد و  $\eta_{AH}$  راندمان حرارتی مشعل می‌باشد.

### ۴- نحوه انجام کار

#### ۴-۱ کلیات و روابط حاکم

با توجه به داده‌برداری‌های خورشیدی در چند سال متوالی در پژوهشگاه مواد و انرژی، میزان تابش بر روی سطوح مختلف در دسترس و قابل محاسبه است. در بازه زمانی مشخص شده، در روز ۱۶ جولای معادل ۲۶ تیر، با پیک دمایی روبرو هستیم که مبنای محاسبات قرار گرفته است. معادلات حاکم بر سیستم



$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (15)$$

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (16)$$

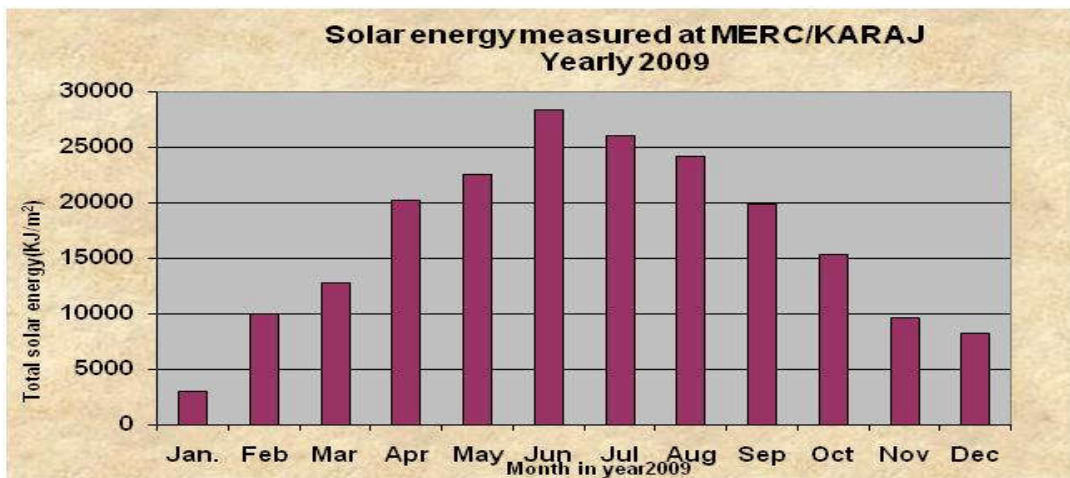
$$E = 292.2 (0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (13)$$

$$B = (N - 1) \left( \frac{360}{365} \right) \quad (14)$$

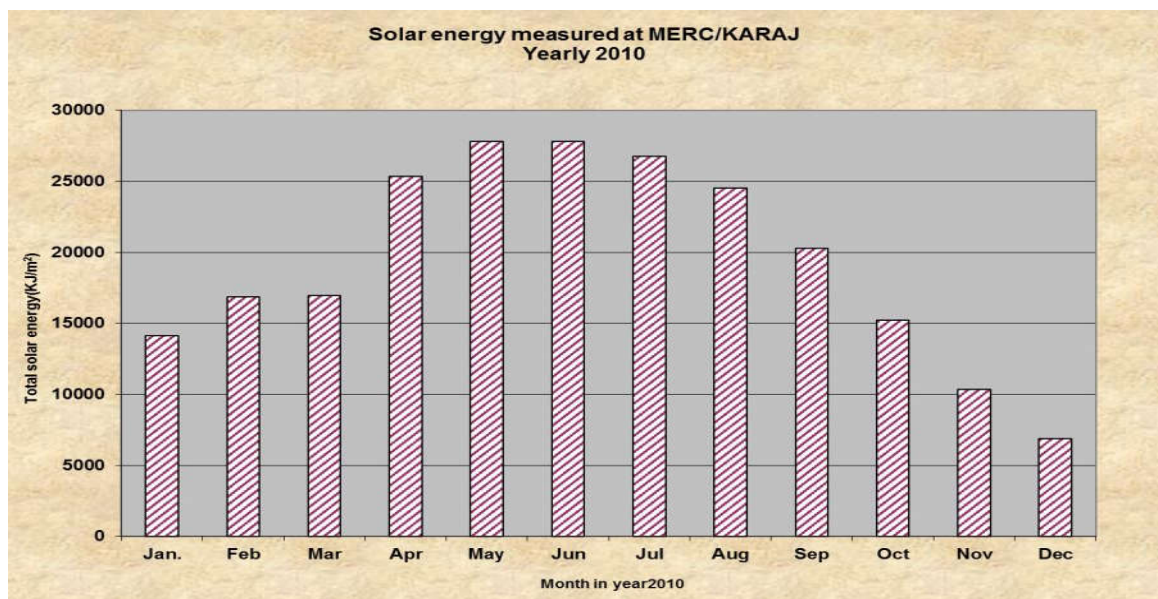
حال نیاز است  $I_0$  را برای روز ۱۶ جولای مابین ساعت‌های ۱۵ و ۱۶ به دست آوریم:

$$I_0 = \frac{12+3600}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0.33 \cos \frac{n}{365} * 360 \right] \times \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (17)$$

در نتیجه ساعت ۱۲:۳۰ تقریباً ظهر خورشیدی در ۱۶ جولای است که به ساعت رسمی کشور و با توجه به ساعت صرفه‌جویی انرژی معادل ساعت ۱۳:۳۰ در روز ۱۶ جولای است. برای ساعت ۱۵ الی ۱۶ میانگین ساعت ۱۵:۳۰ را انتخاب می‌کنیم و به علت فاصله ۲ ساعته با ظهر خورشیدی، در نهایت داریم،  $\omega = +30$ .  
برای محاسبه زاویه آزمون و نسبت تابش مستقیم به تابش کل از روابط ذیل استفاده می‌کنیم:



شکل ۵ مقدار انرژی خورشیدی ماهیانه ثبت شده در سال ۲۰۰۹



شکل ۶ مقدار انرژی خورشیدی ماهیانه ثبت شده در سال ۲۰۱۰



جهت محاسبه توان خروجی متمرکز کننده‌های سهموی از روند محاسباتی زیر استفاده می‌کنیم. اتلاف حرارت در متمرکز کننده‌های سهموی توسط معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q_{loss1} = \frac{\pi D_{co} h_w (T_{co} - T_{ci}) + \varepsilon \pi D_{co} \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4)}{\varepsilon \pi D_{co} \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4)} \quad (23)$$

در معادله فوق: قطر  $D$ ، ضریب گسیل  $\varepsilon$ ، طول کلکتور  $L$ ،  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن، دمای محیط  $T_a$  و دمای آسمان  $T_{sky}$  برای روند حل نیاز است که ابتدا دمای خارجی پوشش شیشه‌ای  $T_{co}$  حدس زده شود که معمولاً نزدیک‌تر به دمای محیط است. زیر نویس 0 بیانگر سطح خارجی پوشش است.  $h_w$  ضریب جابجایی خارجی است که از رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$h_w = \frac{NU.K}{D_{co}} \quad (24)$$

برای محاسبه  $NU$  نیاز به محاسبه عدد رینولدز است که از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (25)$$

سپس از رابطه مک آدامز میزان  $NU$  به دست می‌آید:

$$NU = \begin{cases} 0.4 + 0.54 Re^{0.52} & \text{if } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.3 Re^{0.6} & \text{if } 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (26)$$

دمای داخلی پوشش شیشه‌ای  $T_{ci}$  از رابطه (۲۷) به دست می‌آید:

$$Q_{loss1} = \frac{2\pi k_{cl}(T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co}/D_{ci})} \quad (27)$$

$$Q_{loss2} = \frac{\pi D_r I \sigma (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\left\{ \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{D_r}{D_{ci}} \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right\}} \quad (28)$$

سپس از طریق رابطه (۲۸) پارامتر  $Q_{loss2}$  محاسبه می‌شود. در این رابطه زیر نویس  $r$  بیانگر لوله جاذب است. در صورتی که  $Q_{loss1}$  و  $Q_{loss2}$  به هم نزدیک باشند، روند حل صحیح بوده است. در غیر این صورت باید مجدداً عددی برای دمای خارجی پوشش شیشه‌ای فرض شود و مراحل بالا تکرار شوند. ضریب تلفات  $U_L$  بر اساس سطح جاذب  $A_r$ ، از معادله زیر به دست می‌آید:

$$U_L = \frac{Q_{loss2}}{A_r(T_r - T_{ci})} \quad (29)$$

سپس ضریب بازده کلکتور از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$F' = \frac{1/U_L}{1/U_L + \frac{D_{co}}{h_f D_i} + \frac{D_{co}}{2k} \ln \frac{D_{co}}{D_i}} \quad (30)$$

که  $h_f$  ضریب انتقال حرارت داخل لوله است. ضریب جریان کلکتور از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود:

$$F_R = \frac{m \cdot c_p}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_r}{m \cdot c_p}\right) \right] \quad (31)$$

در این رابطه  $\frac{m \cdot c_p}{A_r U_L F'}$  نرخ ظرفیت بی‌بعد کلکتور است. انرژی دریافتی مفید ( $Q_u$ ) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q_u = F_R A_a \left[ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right] \quad (32)$$

سپس نسبت شدت تابش مستقیم روزانه متوسط ماهیانه را از داده‌هایی که در طی سال‌ها در محل پژوهشگاه اندازه‌گیری شده است را محاسبه می‌کنیم. سپس شاخص ساعتی صافی هوا را از رابطه (۱۶) به دست می‌آوریم:

$$K_T = I/I_0 \quad (18)$$

در این قسمت با استفاده از روابط تجربی موجود در مرجع [۹] نسبت تابش پراکنده به تابش کل را حساب می‌کنیم:

$$I_d/I_0 = 1.557 - 1.84 K_T \quad (19)$$

با توجه به توضیحات مرجع [۹] نتایج مدل آنیزوتروپیک HDKR بسیار دقیق می‌باشند. سپس از این روش برای محاسبه تابش روی سطح شیب‌دار استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است که با توجه به هدف پروژه که جمع‌آوری گرما در تابستان می‌باشد، کلکتور در شیب ۲۰ درجه نسبت به سطح افقی

قرار داده شده است. همچنین ضریب بازتاب محیط اطراف با توجه به وجود بتن، آسفالت و کمی خاک به میزان ۰.۲ لحاظ گردیده شده است. روابط این مدل مطابق زیر می‌باشند:

$$R_b = \text{تابش مستقیم روی سطح افق} / \text{تابش مستقیم روی سطح شیب‌دار} = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_0} \quad (20)$$

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] + \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (21)$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I_T}} \quad (22)$$

نتایج به دست آمده در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳ مقادیر متغیرهای تابشی

متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
n	197	$I_b$	
$\delta$	21.35	$\beta$	20
$\varphi$	35.5	$I_0$	4.13
$\gamma$	0	1	2.25
$\omega$	30	$I_d$	0.556
$\theta$	24.76	$I_T$	2.79
$\theta_z$	29.59	$R_b$	1.044
E	-7.52	$\rho_g$	0.2
B	193.31	$\eta_{opt}$	0.7
S	445.2		



$$\text{RANGE} = T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}} = 7/72 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (34)$$

$$\text{APPROACH} = T_{\text{cold}} - \text{summer wet bulb} = 9.28 \text{ } ^\circ\text{F} \quad (35)$$

که:

$$\text{Summer Wet bulb} = 70.7 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$Q' = 161.7 \times 1.1 = 177.87 \text{ GPM}$$

با داشتن اطلاعات بالا و رجوع به کاتالوگ سازندگان، برج خنک‌کن مدل RF50 شرکت بادران تهویه صنعت جوابگوی نیاز ما خواهد بود. طبق مرجع [7] از ای هر مترمربع کلکتور جهت چیلر جذبی تک اثره نیاز به 70 لیتر حجم منبع ذخیره می‌باشد. بنابراین نیاز به نزدیک 28000 لیتر مخزن ذخیره جهت سیستم ذخیره‌سازی خواهیم داشت.

#### ۵- نتایج و پیشنهادها

بدیهی است که با توجه به عدم وجود همیشگی تابش نیاز به سیستم سوختی جایگزین می‌باشد. همچنین این سیستم به راحتی توانایی تأمین آب گرم موردنیاز گرمایش در زمستان را نیز خواهد داشت. با توجه به نتایج به دست آمده و محدوده دمایی موردنیاز چیلرها درمی‌یابیم که می‌توان با سیستم های سهموی خطی در اوج گرما که اتفاقاً بالاترین شدت تابش نیز وجود دارد بین 6 تا 8 ساعت از نیاز روز را به طور کامل جابگو بود و راندمان سیستم خورشیدی 62 درصدی را دارا باشیم، که بسیار عدد قابل توجهی است. همچنین با توجه اینکه تأمین این دما برای آب موردنظر ژنراتور نیاز به تعداد بسیار زیادی کلکتور خطی لوله خلأ دارد که موجب افت فشار زیاد و هزینه‌های پمپ می‌شود. در این صورت با انتخاب کلکتورهای سهموی خطی می‌توان این مشکل نیز برطرف نمود. لازم به ذکر است که با توجه به نیاز به سیستم های ردیاب خورشید هزینه‌های این سیستم‌ها نیز قابل توجه است.

#### ۶- فهرست علائم

$\phi$	عرض جغرافیایی (درجه)
L	طول جغرافیایی (درجه)
E	ارتفاع از سطح دریا (متر)
$T_{wb}$	دمای مرطوب تابستانی (کلوین)
V	سرعت متوسط باد (متر بر ثانیه)
$Q_e$	گرمای جذب شده توسط ژنراتور برحسب کیلووات
$Q_g$	گرمای ورودی به ژنراتور برحسب کیلووات
$Q_c$	گرمای خروجی از برج خنک‌کننده برحسب کیلووات
$\theta$	زاویه برخورد
HIF	ضریب حرارت ورودی
HMFCF	ضریب تصحیح جریان
RHI	نرخ حرارت ورودی
CCF	ضریب ظرفیت سرمایه‌سازی
RCC	نرخ ظرفیت سرمایه‌سازی
COP	ضریب عملکرد
$\sigma$	ثابت استفان بولتزمن
NU	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز

در این رابطه S میزان تابش کلی بر روی سطح افقی است.  $A_g$  سطح خالص کلکتور بدون تلفات ناشی از تصویر لوله جاذب و  $F_R$  ضریب برداشت حرارت است. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده در پژوهشگاه، میزان تابش خورشید در سطح افقی برای مشکین‌دشت با توجه به مبنای محاسبات یعنی ماه جولای برابر  $7.27 \text{ kw/m}^2$  است که با توجه به تابش 13 ساعته معادل  $559.23 \text{ w/m}^2$  است. برای حل این محاسبات نیازمند اطلاعاتی نظیر طول، پهنا، ضرایب گسیل و ... هستیم که به کلکتور انتخابی وابسته است. از این رو کلکتور سهموی مدل PTC3000 ساخت شرکت SOLITEM ترکیه مبنای محاسبات قرار گرفته است. حال با توجه به اطلاعات زیر می‌توان محاسبات را انجام داد.

#### ۴-۲ داده‌های کلکتور و محاسبات و پارامترهای موردنیاز چیلر:

قطر جاذب 70 میلی‌متر، قطر خارجی پوشش شفاف 100 میلی‌متر، ضخامت پوشش 4 میلی‌متر، ضریب هدایت حرارتی پوشش  $K_c = 1.4 \text{ w/mc}$ ، ضریب گسیل سطح جاذب  $\epsilon_r = 0.13$ ، ضریب گسیل پوشش  $\epsilon_c = 0.8$ ، سرعت باد  $V = 3 \text{ m/s}$ ، دمای هوا 25 درجه سانتی‌گراد، دمای آسمان 17 درجه سانتی‌گراد، پهناي کلکتور  $W = 3 \text{ m}$ ، طول کلکتور  $L = 5 \text{ m}$ ، دمای سیال ورودی به جاذب  $T_i = 90.55$  درجه سانتی‌گراد، دبی سیال  $0.0537 \text{ Kg/s}$ ، گرمای ویژه سیال  $C_p = 3.26 \text{ kJ/kgc}$ ، ضریب انتقال حرارت داخل لوله  $h_f = 400 \text{ w/m}^2$ ، ضریب هدایت حرارتی جاذب  $k = 16 \text{ w/mc}$ ، ضخامت دیواره جاذب 5 میلی‌متر با فرض دمای خارجی پوشش شیشه‌ای برابر 303 درجه کلوین آغاز می‌کنیم و در نهایت بعد از چندین مرحله به نتایج نهایی که در قالب جدول 7 می‌باشد دست پیدا خواهیم کرد. حال مطابق رابطه (15) با تقسیم گرمای ورودی به ژنراتور بر توان خروجی از کلکتور خورشیدی می‌توان مساحت کل موردنیاز کلکتور را به دست آورد.

$$A_c = \frac{Q_g}{Q_u} \quad (33)$$

جدول 7 داده‌های خروجی کلکتور			
مقدار	متغیر	مقدار	متغیر
1.099	$A_f$	1919.3	Re
14.5	$A_a$	111.42	NU
0.9949	F''	325.15	$T_{co}$
0.988	$F_R$	325.6	$T_{ci}$
6238.58	$Q_u$	34.2	$Q_{loss}$
29.18	$h_w$	2.07	$U_l$
		0.9938	F'

با توجه به مرجع [6]، با صرف‌نظر کردن از سه درصد انرژی حرارتی جذب‌شده در کلکتور، به منظور لحاظ کردن اثرات گردوغبار و سایه و مطابق با رابطه (33) کل سطح کلکتور موردنیاز با 2 دستگاه چیلر، برابر با 430.6 مترمربع می‌باشد که از 28 کلکتور مدل PTC 3000 قابل‌دستیابی است. جهت دفع گرمای آب و انتخاب برج خنک‌کن مناسب نیاز به دانستن اطلاعات دمای مرطوب است که با توجه به مرجع [5]، دمای مرطوب تابستان در شهر کرج برابر با 70.7 درجه فارنهایت است. سایر مشخصات عبارت‌اند از:





## ۷- مراجع

- [1] گزارش دفتر مطالعات انرژی، صنعت و معدن مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی ۱۳۹۳.
- [2] M. Ishimatsu, Yazaki co, advanced absorption chillers: utilization of various heat energies for airconditioning, *1st European conference on Polygeneration*.
- [3] M. Aminzadeh, Design and feasibility of using parabolic trough collector in cooling of MERC solar building, *3rd solar international conference*.
- [4] S.k. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, Mc Graw-H. K, Second edition, 2001.
- [5] G. Heidarinejad, M. Heidarinejad, Sh. Delfani, Outdoor design conditions data for the cities of Iran.
- [6] K. Mohammadi, H. Khorasanizadeh, A review of solar radiation on vertically mounted solar surfaces and proper azimuth angles in six Iranian major cities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47 (1), Mar 2015.
- [7] A. Shirazi, R.A. Taylor, S.D. White, G.L. Morrison, A systematic parametric study and feasibility assessment of solar-assisted single-effect, double-effect, and triple-effect absorption chillers for heating and cooling applications, *Energy procedia*, Vol. 91, pp. 844-856, Jun 2016.
- [8] R.Z. Wang, T.S. Ge, C.J. Chen, Q. Ma, Z.Q. Xiong, Solar sorption cooling systems for residential applications: Options and guidelines, *International Journal of Refrigeration* 32(4), pp.638-660, June 2009.
- [9] O.F. Adeoye, O. Aodeji, Parametric Evaluation of a Parabolic Trough Solar Collector, *Journal of Energy Technologies and Policy*, Vol.4(4), pp. 48-56, 2014.

Ta دمای محیط  
 $T_{sky}$  دمای آسمان  
 $T_{ci}$  دمای داخلی پوشش شیشه‌ای  
 $T_{co}$  دمای خارجی پوشش شیشه‌ای  
 $T_i$  دمای سیال ورودی  
 $U_i$  ضریب تلفات  
 $F'$  ضریب بازده کلکتور  
 $F''$  ضریب جریان کلکتور  
 $F_R$  ضریب برداشت حرارتی  
 $S$  تابش بر روی سطح افقی  
 $A_a$  سطح خالص کلکتور  
 $Q_u$  انرژی دریافتی مفید  
 $K_c$  ضریب هدایت حرارتی پوشش  
 $K$  ضریب هدایت حرارتی جاذب  
 $C_p$  گرمای ویژه سیال



فصلنامه علمی - پژوهشی انرژی های تجدیدپذیر و نو - سال سوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۵