



مطالعه سیستم سرمایش جذبی خورشیدی دو اثره لیتیم بروماید-آب

مرتضی حیدر^۱، منصور خانکی^{۲*}، سید عباس سادات سکاکی^۲، بهنام کرملو^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* قزوین، کدپستی: ۳۴۱۴۹۱۶۸۱۸، khanaki@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

با توجه به بحران انرژی و محدود بودن منابع سوختهای فسیلی و آلاینده‌گی ناشی از آنها که نگرانی‌های جدی در رابطه با مسائل زیست محیطی به وجود آورده‌اند، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی و همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه بیشتر قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از انرژی مصرفی در ساختمانها توسط سیستمهای تهویه مطبوع مصرف می‌گردد. سیستمهای تبرید جذبی با توجه به درجه حرارت ژنراتور می‌توانند با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و خورشیدی بخوبی کار کنند. در این پژوهش، سیستم سرمایش جذبی خورشیدی دو اثره لیتیم بروماید-آب، برای استفاده در شهر تهران در فصل تابستان، شبیه‌سازی شده است. با بررسی سیستم جذبی مشخص شد که ضریب عملکرد سیستم با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا افزایش می‌یابد البته روند این افزایش با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا از مقدار ۱۳۰ درجه سلسیوس به بعد، ناچیز است. از آنجا که افزایش دمای ژنراتور بالا همراه با مصرف انرژی است، دمای مناسب برای ژنراتور فشار بالا ۱۳۰ درجه سلسیوس پیشنهاد میشود. کلکتورهای استفاده شده در این سیستم، از نوع سهمی شکل با محور ثابت می‌باشد بدلیل اینکه متوسط گرمای جذب شده در کلکتور در هر ماه متغیر است، از آرایش موازی برای کلکتورها استفاده شده است. به این طریق در هر ماه، برای این که انرژی خورشیدی مورد نیاز تامین شود، سطح کلکتور تعیین شده است. پس از محاسبات و بهینه‌سازی، برای توان ۲۰ kW تبرید، مساحت بهینه کلکتور برابر با ۵۲٫۵ متر مربع بدست آمده است. هم‌چنین با تحلیل انجام شده برای تعیین حجم مناسب برای تانک ذخیره، مقدار آن ۴ مترمکعب تعیین گردیده است.

کلیدواژگان: چیلر جذبی، دواتره، کلکتور خورشیدی، تانک ذخیره

Study on two effect lithium bromide-water solar absorption cooling system

Mortez Haydar^۱, Mansour Khanaki^{۲*}, Abbas Sadatsakkak^۲, Behnam Karamloo^۱

^۱- MS student, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

^۲- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* Postal Code: ۳۴۱۴۸ - ۹۶۸۱۸ Qazvin, Iran, khanaki@eng.ikiu.ac.ir

Received: ۲۲ December ۲۰۱۵ Accepted: ۳۰ January ۲۰۱۶

Abstract

Due to energy crisis and shortage of fossil fuels and emissions from those that have arisen serious concerns in relation to environmental issues, the use of renewable energy, especially solar energy has many attentions. A significant part of energy used in buildings is consumed by air conditioning systems. According to temperature of the generator, renewable and solar energy can be used as thermal driver in absorption refrigeration systems. In this study, two effects lithium bromide-water solar absorption cooling systems is simulated to be used in Tehran in summer. It is shown that coefficient of performance is increased by increasing temperature of high pressure generator until ۱۳۰°C significantly and after that remain approximately constant. Since the high temperature generator has high energy consumption, temperature of ۱۳۰ °C is recommended for high pressure generator. Collectors used in this system are fixed axis parabolic ones. Because the average heat absorbed by the collector varies each month, parallel arrangement are used. Required collector area is determined due to needed solar energy. For ۲۰ kW cooling capacity, ۵۲٫۵ m^۲ collector area is required with a ۴ m^۳ storage tank.

Keywords: absorption chiller, two effect, lithium bromide-water, solar collector, storage tank,

۱- مقدمه

مقایسه نتایج خود و نتایج [۵] در یک حالت خاص به طور وسیع تری به آنالیز عملکرد سیستم سرمایشی جذبی لیتیم بروماید- آب، دو اثره با به کارگیری انرژی خورشیدی در ژنراتورها و استفاده از روش خنک سازی با هوا در ابزوربر و کندانسور در شهرهای نیمه گرم سیری پرداخته اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌داد که دمای ورودی به کلکتور باید کم‌تر از ۱۴۸ درجه سلسیوس باشد تا کریستالیزاسیون در شرایطی که محیط دارای بالاترین دماست اتفاق نیفتد البته این دما برای حالتی که بازدهی مبدل حرارتی دما پایین ۰.۷ است بدست آمده است و برای حالت‌هایی که بازدهی این مبدل بیش‌تر می‌باشد این دما کاهش می‌یابد و در کل بازه مناسب دمای کلکتور ۱۱۰-۱۳۰ درجه سلسیوس گزارش شده است. عربی و دهقانی [۷] به بررسی فنی و اقتصادی سیستم چیلر جذبی خورشیدی در ایران با سیال عامل‌های آب و آمونیاک پرداخته‌اند. کیانگ ها و وکیل الرعایا [۸] یک سیستم جذبی خورشیدی تک اثره با طرحی جدید ارائه کردند. در طرح آن‌ها از هیچ یک از اجزای مبدل حرارتی، تانک ذخیره و انرژی اضافی برای تهیه آب گرم در ژنراتور استفاده نشده و تنها منبع انرژی آن‌ها خورشید می‌باشد.

در تحقیق حاضر، سیستم سرمایش جذبی خورشیدی دو اثره لیتیم بروماید- آب، به منظور تامین انرژی سرمایشی ساختمانی در شهر تهران با ظرفیت سرمایشی مورد نیاز ۲۰ کیلووات از ساعت ۷-۲۰ در فصل تابستان شبیه‌سازی شده و ضمن بررسی عوامل تاثیرگذار در عملکرد سیستم جذبی، ابعاد مناسب برای تانک ذخیره و کلکتور خورشیدی برای ایجاد انرژی گرمایی پایدار در ژنراتور جستجو شده است.

۲- توصیف فرایند

۲-۱- سیستم سرمایش جذبی

سیستم سرمایش جذبی دو اثره که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است در شکل ۱ به نمایش در آمده است. در سیستم چیلر جذبی لیتیم بروماید- آب، آب به عنوان مبرد و لیتیم بروماید به عنوان جاذب شناخته می‌شوند. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود این سیستم دارای دو ژنراتور است، که با نام‌های ژنراتورهای فشار بالا و فشار پایین شناخته می‌شوند. هم چنین این سیستم دارای یک کندانسور، اواپراتور، ابزوربر، پمپ و دو مبدل حرارتی برای محلول و دو شیر انبساط برای قسمت محلول و دو شیر انبساط برای قسمت مبرد می‌باشد. به این ترتیب این سیستم دارای سه سطح فشاری متفاوت می‌باشد که در سطح فشاری پایین اواپراتور و ابزوربر، در سطح فشاری متوسط کندانسور و ژنراتور فشار پایین و در سطح فشار بالا ژنراتور فشار بالا قرار دارند. سیستم جذبی مورد بررسی برای خنک کاری یک محیط نیاز به این دارد که مرتب آب جاری در کویل حرارت خود را به یک محیط سرد انتقال دهد و خود خنک شود. به همین دلیل با جریان یافتن آب کویل در اواپراتور، مبرد با گرفتن گرمای اضافی از آب کویل تبخیر می‌شود. (از آن جا که آب باید در دمای پایین تبخیر شود فشار اواپراتور نیز مقدار پایینی دارد.) مبرد با حالت بخار اشباع از اواپراتور خارج می‌شود و توسط محلول جاذب لیتیم بروماید در ابزوربر جذب می‌شود و از آن جا که این محلول با جذب مقداری بخار آب و رقیق شدن کارایی خود را در جذب مبرد از دست می‌دهد برای عمل تغلیظ به سمت ژنراتور دما بالا که قسمت دما بالای سیستم می‌باشد پمپ می‌شود. در این ژنراتور مقداری از بخار موجود در محلول با گرم شدن از محلول جدا می‌شود. محلول خروجی که دارای غلظت متوسط در سیستم جذبی است باید به حالت اولیه موجود در ابزوربر که دارای

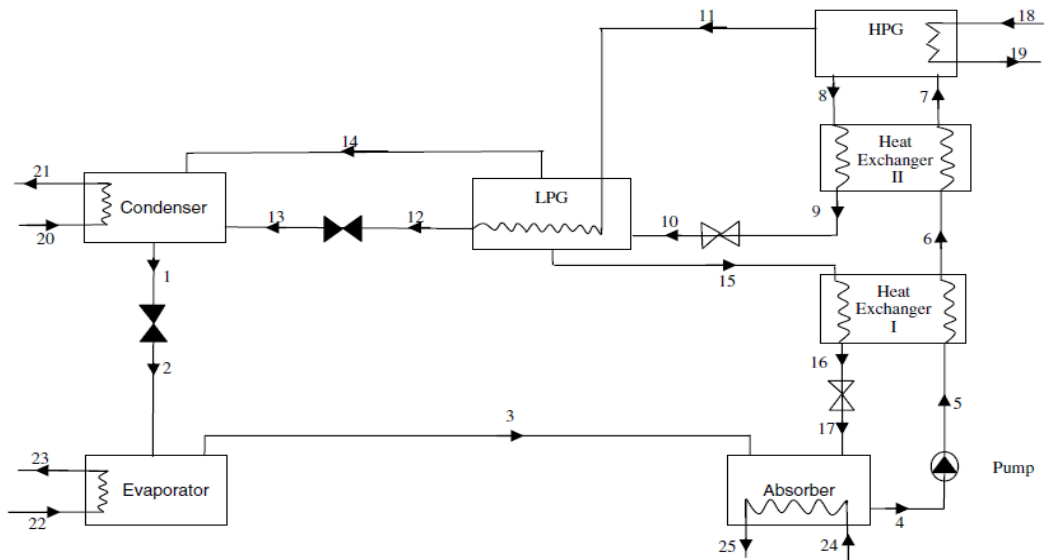
انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع بی‌پایان انرژی برای کره زمین، همواره بخش قابل توجهی از تحقیقات علمی و پژوهشی را به خود اختصاص داده است. امروزه حدود ۸۰٪ از انرژی مصرفی، از سوخت‌های فسیلی بدست می‌آید و با توجه به تجدید ناپذیر بودن این نوع سوخت‌ها، انرژی خورشیدی جایگزین بسیار مناسبی می‌باشد. هم‌چنین با توجه به این‌که بخش بزرگی از انرژی مصرفی در فصل تابستان به سرمایش اماکن مسکونی و اداری اختصاص دارد و این مساله منجر به بحران انرژی شده است، لذا چیلرهای خورشیدی می‌توانند به جایگزین مناسبی برای چیلرهای تراکمی، که مصرف برق بالایی دارند تبدیل شوند. سیستم‌های سرمایشی جذبی، در سال‌های اخیر از نقطه نظر انرژی و محیط زیست مشهور و پرطرفدار شده‌اند. با وجود این‌که ضریب عملکرد سیستم‌های جذبی در مقایسه با سیستم‌های تراکمی کم‌تر است اما به دلیل قابلیت استفاده از گرماهای اتلافی ارزان، خورشیدی، زمین گرمایی یا منابع انرژی زیست توده با هزینه تامین ناچیز در این سیستم‌ها، سیستم‌های جذبی از جذابیت خاصی برخوردار هستند. هم‌چنین سیستم‌های جذبی از مواد طبیعی استفاده می‌کنند که خطر تخریب لایه اوزن و گرمای جهانی در آن‌ها وجود ندارد.

تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی سیستم‌های جذبی توسط محققین انجام شده است. وناس و همکارانش [۱] سیکل جذبی دو طبقه‌ای و دو اثره آمونیاک- لیتیم نترات را مورد بررسی قرار داده‌اند. از ویژگی این سیکل، می‌توان به قابلیت استفاده آن در فشارهای پایین‌تر از فشارهای معمول و عدم وجود کریستالیزاسیون در دمای ورودی اواپراتور بالاتر از ۱۰- درجه سلسیوس اشاره کرد. هم‌چنین ضریب عملکرد آن ۱.۲۵ در دمای ورودی آب گرم ۱۰۰ درجه سلسیوس بدست آمده است. عمر کتفی و همکارانش [۲] عملکرد سیستم سرمایشی خورشیدی تک اثره لیتیم بروماید- آب ساخت شرکت یازاکی را با شبیه‌سازی در برنامه متلب مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که ضریب عملکرد سیستم جذبی با افزایش دمای ژنراتور و اواپراتور، افزایش و با افزایش دمای ابزوربر و کندانسور کاهش می‌یابد. ال اوگلا و ال شراوی [۳] نیز تجزیه و تحلیل فنی- اقتصادی سیستم‌های تهویه مطبوع را با به کارگیری سیستم‌های خورشیدی در ساختمان‌های تجاری در عربستان سعودی انجام داده‌اند. در پژوهش آن‌ها سه سیکل سرمایشی تراکمی معمولی، جذبی لیتیم بروماید- آب خورشیدی و چیلر تراکمی خورشیدی فنوولتایک از نظر فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفته است. هانگ و مین گیو [۴] تاثیر تانک‌های ذخیره گرم و سرد را بر روی سیستم سرمایش جذبی خورشیدی مورد استفاده در یک ساختمان اداری بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که تانک ذخیره سرد با اندازه‌ای قابل قبول ظرفیت چیلر را افزایش می‌دهد اما تاثیری در عملکرد انرژی سیستم ندارد. هم‌چنین آنالیز حساسیت انجام گرفته توسط آن‌ها حاکی از این بود که سیستم سرمایشی خورشیدی نسبت به سطح کلکتور بیش‌ترین حساسیت را از خود نشان می‌دهد. گمری و حکیمی [۵] سیستم چیلر جذبی بخار دو اثره را مورد آنالیز انرژی قرار داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از این بود که ضریب عملکرد سیستم با افزایش دمای ژنراتور فشار پایین افزایش می‌یابد ولی با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا کاهش می‌یابد. هم‌چنین بالاترین اتلاف انرژی اجزا در ابزوربر و ژنراتور فشار بالا اتفاق می‌افتد. زیولی و همکارانش [۶] نیز طبق الگوریتم ارائه شده در [۵] و بررسی صحت نتایج با

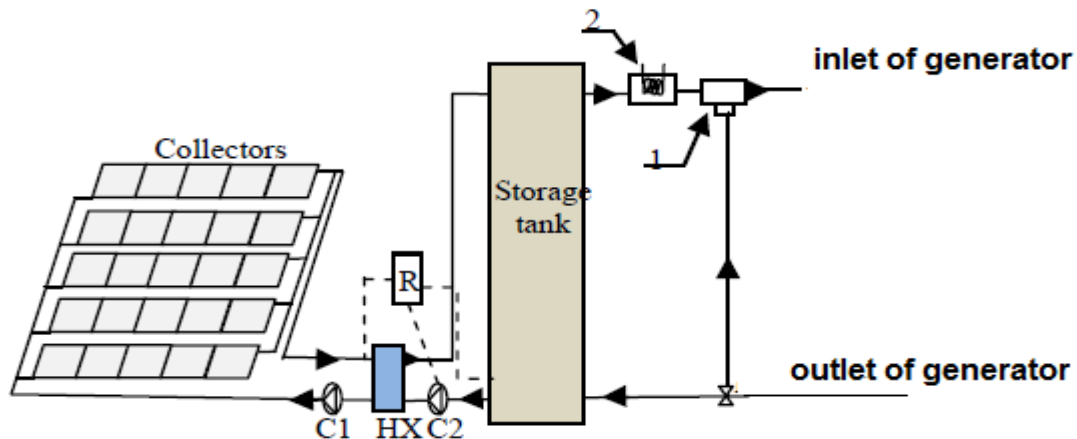
فرایند انتقال گرما از کلکتور خورشیدی به ژنراتور در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای تامین بار حرارتی مورد نیاز در ژنراتور، کلکتور خورشیدی از نوع متمرکزکننده سهمی شکل استفاده شده است. آب جاری در لوله‌های کلکتور با جذب انرژی خورشیدی گرم شده و ضمن تبادل حرارت با سیال عبوری از مبدل حرارتی به شرایط اولیه دمای ورودی به کلکتور می‌رسد. در این پژوهش فرض بر آن است که دمای ورودی کلکتور ثابت باشد. آب گرم خروجی از مبدل حرارتی به تانک ذخیره باز گردانده می‌شود. برای تامین بار حرارتی مورد نیاز در ژنراتور، با تنظیم مقدار دبی خروجی از تانک ذخیره به سمت ژنراتور، انرژی مورد نیاز از تانک ذخیره تامین می‌شود. برای تبادل حرارت بین تانک ذخیره و ژنراتور نیاز به اختلاف دما می‌باشد. هنگامی که اختلاف دمای تانک و جریان ورودی ژنراتور به کمتر از ۷ درجه سلسیوس برسد گرم‌کن کمکی برای ایجاد این اختلاف دما به تانک ذخیره، حرارت وارد می‌کنند. دلیل این اختلاف دمای معین، کاهش کار مصرفی در پمپ می‌باشد.

دما و فشار پایین‌تر است بازگردانده شود به همین در مبدل حرارتی دما بالا با محلول رقیق تبادل حرارتی می‌کند و سپس وارد شیر انبساط می‌شود و دما و فشارش کاهش می‌یابد و در ژنراتور فشار پایین ضمن تبادل حرارتی با بخارهای خروجی از ژنراتور دما بالا که دمای بیش‌تری دارند مقداری از بخار خود را از دست می‌دهند و به این ترتیب غلظت محلول به بیش‌ترین مقدار خود در سیستم می‌رسد و با عبور از مبدل حرارتی دما پایین و شیر انبساط به ایزوبر بازگردانده می‌شود. بخارهای خروجی از ژنراتور فشار پایین نیز با خنک شدن در کندانسور به صورت مایع اشباع از کندانسور خارج می‌شوند و با کاهش فشار توسط شیر انبساط طی یک فرایند آنتالپی ثابت به اواپراتور وارد می‌شوند.

۲-۲- سیستم خورشیدی



شکل ۱ شماتیک سیستم سرمایش جذبی دو اثره لیتیم بروماید-آب



شکل ۲ شماتیک سیستم خورشیدی در چیلر جذبی خورشیدی: ۱- مخلوط کننده ۲- گرم کن کمکی

۳- شبیه‌سازی سیستم سرمایش جذبی

در مطالعه حاضر، سیستم سرمایش جذبی دو اثره، در نرم‌افزار ایز (ورژن حرفه‌ای)^۱ مدل‌سازی شده است. سیستم شبیه‌سازی شده برای ایجاد بار سرمایش ۲۰ کیلو وات و دمای اواپراتور ۵ درجه سلسیوس تعبیه شده است.

۱-۳- فرضیات در سیستم سرمایش جذبی

به منظور شبیه‌سازی سیستم چیلر جذبی دو اثره لیتیم بروماید - آب فرضیات زیر انجام شده است:

- تحلیل‌ها بر اساس شرایط پایدار در سیستم انجام شده است.

- میرد در خروجی کندانسور مایع اشباع است.

- میرد در خروجی اواپراتور بخار اشباع است.

- منظور از دمای ایزوربر، دمای محلول رقیق خروجی از ایزوربر می‌باشد.

- منظور از دمای کندانسور، دمای میرد خروجی از آن می‌باشد.

- منظور از دمای ژنراتورها نیز دمای محلول خروجی از آن‌ها می‌باشد.

$$(T_8, T_{15})$$

- تبادل حرارتی بین محیط و سیستم اتفاق نمی‌افتد.

- دمای جریان هوا خنک به ایزوربر برابر با دمای محیط است.

- کار مصرفی در پمپ‌ها قابل صرف‌نظر هستند.

۲-۳- معادلات در سیستم سرمایش جذبی

برای همه اجزای موجود در سیستم چیلر جذبی معادلات بقای جرم کل، بقای جرم ماده‌ی جاذب و بقای انرژی که در معادلات ۳-۱ آورده شده است برقرار است.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (۱)$$

$$\sum \dot{m}_i x_i = \sum \dot{m}_o x_o \quad (۲)$$

$$Q = \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o \quad (۳)$$

تاثیر یا بازدهی مبدل‌های حرارتی دما پایین و دما بالا به ترتیب در معادله‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است.

$$\varepsilon_I = (T_{15} - T_{16}) / (T_{15} - T_5) \quad (۴)$$

$$\varepsilon_{II} = (T_8 - T_9) / (T_8 - T_6) \quad (۵)$$

پارامتر نسبت توزیع انرژی در ژنراتورها از رابطه‌ی ۶ بدست می‌آید:

$$\alpha = Q_{HG} / Q_{LG} \quad (۶)$$

ضریب عملکرد سیستم، از رابطه‌ی ۷ بدست می‌آید.

$$COP = Q_{EVA} / Q_{HG} \quad (۷)$$

۳-۳- روند نیل به نتیجه در سیستم سرمایش جذبی

با توجه داده‌های اولیه از قبیل دمای اواپراتور، بار سرمایشی، نسبت توزیع انرژی در ژنراتورها و دمای ورود و خروج برج خنک‌کننده در ایزوربر و کندانسور می‌توان جرم میرد در نقطه ۱، دمای ژنراتور دما بالا، دمای ایزوربر و کندانسور و غلظت محلول رقیق خروجی از ایزوربر را بدست آورد. با فرض

مقادیر اولیه برای غلظت محلول در خروجی از ژنراتور فشار بالا و پایین کل چرخه را می‌توان حل نمود. در این حالت مقدار α چک می‌شود اگر برابر با ۱،۵ نبود مقدار غلظت محلول غلیظ طبق روش نیوتن رافسون تغییر داده می‌شود و دوباره چرخه با این مقدار جدید برای غلظت محلول خروجی ژنراتور فشار بالا و همان مقدار فرض شده برای غلظت محلول خروجی از ژنراتور فشار پایین حل می‌شود و این روند ادامه پیدا می‌کند تا مقدار α به ۱،۵ برسد سپس بالانس انرژی در ژنراتور فشار پایین بررسی می‌شود که اگر بالانس انرژی برقرار نباشد فقط غلظت محلول غلیظ تغییر داده می‌شود تا در نهایت بالانس انرژی در این جزء برقرار شود.

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی سیستم سرمایش جذبی

۳-۴-۱- نتایج مربوط به تغییرات دمای ژنراتور فشار بالا و پایین

با توجه به مقادیر داده شده در جدول ۱ که مشابه اطلاعات استفاده شده در مرجع ۴ می‌باشد و شبیه‌سازی فرایند در نرم افزار ایز و استفاده از روش نیوتن رافسون در فرایند بدست آوردن مقدار صحیح غلظت محلول متوسط، نتایج نقاط مختلف سیکل و نتایج مربوط به عملکرد سیکل که در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده برای این حالت خاص به دست آمده‌اند که مشابه نتایج بدست آمده در مرجع ۴ می‌باشد که نشان از صحت انجام فرایند شبیه‌سازی است.

در شکل ۳ نمودار تغییرات ضریب عملکرد سیستم جذبی دو اثره شبیه‌سازی شده تحت تاثیر دمای ژنراتور فشار بالا و ژنراتور فشار پایین نمایش داده شده است. نمودار رسم شده با فرض ثابت گرفتن مقادیر پارامترهای عملیاتی نشان داده شده در جدول ۱ و فقط تغییر دمای ژنراتورهای فشار بالا و فشار پایین بدست آمده است

جدول ۱ اطلاعات ثابت استفاده شده در شبیه‌سازی

| اجزا | مشخصات پارامتر | نشانه | مقدار | واحد |
|--------------------|-------------------------|--------------------|---------------|-------------|
| کندانسور | دمای کندانسور | T_{CD} | ۳۵ | $^{\circ}C$ |
| | دمای ورودی برج خنک کن | T_{icw} | ۲۷ | $^{\circ}C$ |
| | دمای خروجی برج خنک کن | T_{ocw} | ۳۲ | $^{\circ}C$ |
| ایزوربر | دمای ایزوربر | T_{AB} | ۳۵ | $^{\circ}C$ |
| | دمای ورودی برج خنک کن | T_{icw} | ۲۷ | $^{\circ}C$ |
| | دمای خروجی برج خنک کن | T_{ocw} | ۳۲ | $^{\circ}C$ |
| اواپراتور | دمای اواپراتور | T_{EVA} | ۴ | $^{\circ}C$ |
| | دمای ورودی آب خنک شده | T_{ichw} | ۱۲ | $^{\circ}C$ |
| | دمای خروجی آب خنک شده | T_{ochw} | ۷ | $^{\circ}C$ |
| ژنراتور فشار بالا | دمای ژنراتور فشار بالا | T_{HG} | ۱۳۰ | $^{\circ}C$ |
| | دمای خروجی آب گرم | T_{ohw} | $T_{HG} + 10$ | $^{\circ}C$ |
| | دمای ورودی آب گرم | T_{ihw} | $T_{ohw} + 8$ | $^{\circ}C$ |
| ژنراتور فشار پایین | دمای ژنراتور فشار پایین | T_{gl} | ۸۰ | $^{\circ}C$ |
| مبدل حرارتی ۱ | بازدهی مبدل حرارتی | ε_I | ۷۰ | % |
| مبدل حرارتی ۲ | بازدهی مبدل حرارتی | ε_{II} | ۷۰ | % |
| پمپ | بازدهی پمپ | η_p | ۹۵ | % |

^۱ EES (Professional)

توجه به این نکته مهم است که دمای ژنراتور فشار پایین قطعا رابطه مستقیم با دمای ژنراتور فشار بالا دارد و با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا می‌توان به دماهای بالا برای ژنراتور فشار پایین دست یافت. بر اساس این نکته همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا بازه تغییرات دمای ژنراتور فشار پایین بیش‌تر می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود برای یک دمای ثابت ژنراتور فشار بالا با افزایش دمای ژنراتور فشار پایین، ضریب عملکرد سیستم در ابتدا با شیب تند افزایش می‌یابد و بعد از افزایش مقداری دمای ژنراتور فشار پایین با شیب ملایم افزایش خواهد داشت. هم چنین با افزایش بیشتر دمای ژنراتور فشار بالا نسبت به حالتی که دمای ژنراتور فشار بالا ۱۳۰ درجه سلسیوس است تغییرات ناچیزی در ضریب عملکرد سیستم جذبی مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به هزینه‌ای که برای تولید انرژی گرمایی در ژنراتور باید صرف شود میتوان نتیجه گرفت دمای مناسب ژنراتور فشار بالا برای این سیستم باید بین ۱۲۵ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس باشد.

۳-۴-۲- نتایج ارتباط بین بازدهی مبدل‌های حرارتی و عملکرد سیستم

نمودار مربوط به تغییرات ضریب عملکرد سیستم جذبی دو اثره تحت تاثیر بازدهی مبدل‌های حرارتی دما پایین و دما بالا در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، بازدهی مبدل‌های دما بالا و پایین در حالت پایه با هم برابر و مقدار ۰,۷ تعیین شده است. برای بررسی تاثیر بازدهی هر مبدل در عملکرد سیستم در هر حالت بازدهی یک مبدل ثابت و بازدهی مبدل دیگر تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که در یک دمای اواپراتور ثابت با افزایش بازدهی مبدل‌ها ضریب عملکرد سیستم افزایش می‌یابد و شیب افزایش ضریب عملکرد با تغییر بازدهی مبدل دوم بیشتر است. هم چنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای اواپراتور ضریب عملکرد افزایش خواهد داشت.

۴- شبیه‌سازی سیستم خورشیدی

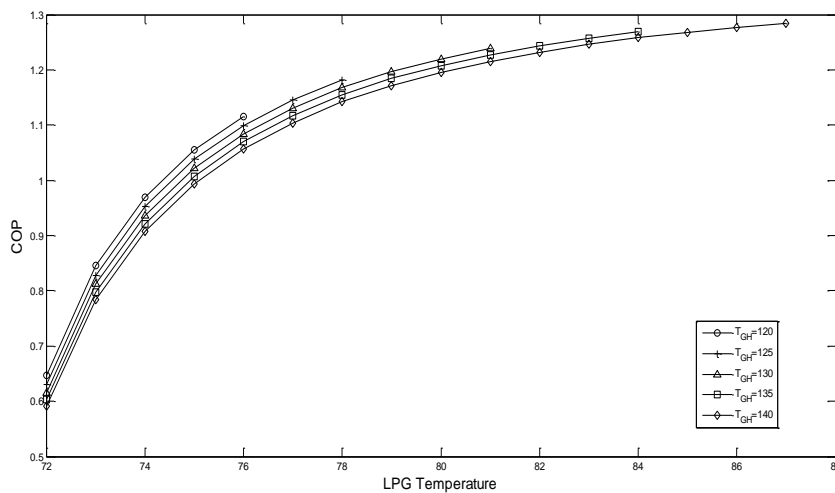
طبق نتایج بدست آمده و ذکر شده در بالا سیستم سرمایش جذبی دو اثره، در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس برای ژنراتور فشار بالا به ضریب عملکردی بالا و در عین حال منطقی می‌رسد. برای رسیدن به چنین دمایی، کلکتور انرژی خورشیدی را جذب و تانک این انرژی را ذخیره و برای مصرف پایدار به ژنراتور منتقل می‌کند.

جدول ۲ نتایج بدست آمده برای نقاط مختلف چیلر جذبی دو اثره بر اساس تحلیل ترمودینامیکی

| نقطه | دبی جرمی (kg/s) | دما (°C) | غلظت (%) |
|------|--------------------|----------|----------|
| ۱ | ۰,۱۲۷۰۲ | ۳۵ | ۰ |
| ۲ | ۰,۱۲۷۰۲ | ۴ | ۰ |
| ۳ | ۰,۱۲۷۰۲ | ۴ | ۰ |
| ۴ | ۱,۷۳۶۷۴ | ۳۵ | ۵۵,۸۶۹ |
| ۵ | ۱,۷۳۶۷۴ | ۳۵ | ۵۵,۸۶۹ |
| ۶ | ۱,۷۳۶۷۴ | ۶۳,۴۳ | ۵۵,۸۶۹ |
| ۷ | ۱,۷۳۶۷۴ | ۱۰۸,۵۱ | ۵۵,۸۶۹ |
| ۸ | ۱,۶۷۱۳۲ | ۱۳۰ | ۵۸,۰۵۶ |
| ۹ | ۱,۶۷۱۳۲ | ۸۳,۴ | ۵۸,۰۵۶ |
| ۱۰ | ۱,۶۷۱۳۲ | ۷۵,۸۶ | ۵۸,۰۵۶ |
| ۱۱ | ۰,۰۶۵۲۳ | ۱۳۰ | ۰ |
| ۱۲ | ۰,۰۶۵۲۳ | ۸۲,۴۷ | ۰ |
| ۱۳ | ۰,۰۶۵۲۳ | ۳۵ | ۰ |
| ۱۴ | ۰,۰۶۱۸۰ | ۸۰ | ۰ |
| ۱۵ | ۱,۶۰۹۷۲ | ۸۰ | ۶۰,۲۷۸ |
| ۱۶ | ۱,۶۰۹۷۲ | ۴۸,۵ | ۶۰,۲۷۸ |
| ۱۷ | ۱,۶۰۹۷۲ | ۴۴,۲۴ | ۶۰,۲۷۸ |
| ۱۸ | ۷,۳۴۰۲۸ | ۱۴۸ | - |
| ۱۹ | ۷,۳۴۰۲۸ | ۱۴۰ | - |
| ۲۰ | ۷,۹۹۰۰۱ | ۲۷ | - |
| ۲۱ | ۷,۹۹۰۰۱ | ۳۲ | - |
| ۲۲ | ۱۴,۲۸۵۴۶ | ۱۲ | - |
| ۲۳ | ۱۴,۲۸۵۴۶ | ۷ | - |
| ۲۴ | ۱۸,۳۱۸۷۶ | ۲۷ | - |
| ۲۵ | ۱۸,۳۱۸۷۶ | ۳۲ | - |

جدول ۳ توان تولیدی و مصرفی اجزا در سیستم جذبی دو اثره شبیه‌سازی شده

| اجزا | نشانه | توان | واحد |
|-------------------|-----------|------|------|
| ژنراتور فشار بالا | Q_{HG} | ۱۶,۴ | kW |
| اواپراتور | Q_{EVA} | ۲۰ | kW |
| ضریب عملکرد سیستم | COP | ۱,۲۲ | - |



شکل ۳ نمودار ضریب عملکرد سیستم چیلر جذبی دو اثره در مقابل دمای ژنراتور فشار بالا و ژنراتور فشار پایین

۶- گرم کن کمکی هنگامی که دمای تانک به کم تر از ۱۵۵ درجه سلسیوس می رسد عمل می کند.

۲-۴- معادلات سیستم خورشیدی

برای محاسبه انرژی جذب شده در کلکتور به مقادیر شدت تابش خورشید و دمای محیط نیاز است. این اطلاعات از پایگاه های هواشناسی کشور بدست آمده است. نحوه تغییرات این پارامترها در طول یک روز عادی برای ماه های مختلف فصل تابستان در شهر تهران، در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است [۹]. بازدهی کلکتور خورشیدی از نوع سهمی با محور ثابت، از معادله ۸ بدست می آید. با مشخص کردن سطح کلکتور و محاسبه بازدهی کلکتور گرمای جذب شده در کلکتور طبق رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$\eta_C = 0.49204 - 0.29002 \cdot (T_{Cin} - T_{amb}) / I \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{Collector} = \eta_C \cdot I \cdot A_C \quad (9)$$

دمای خروجی کلکتور طبق رابطه ۱۰ بدست می آید:

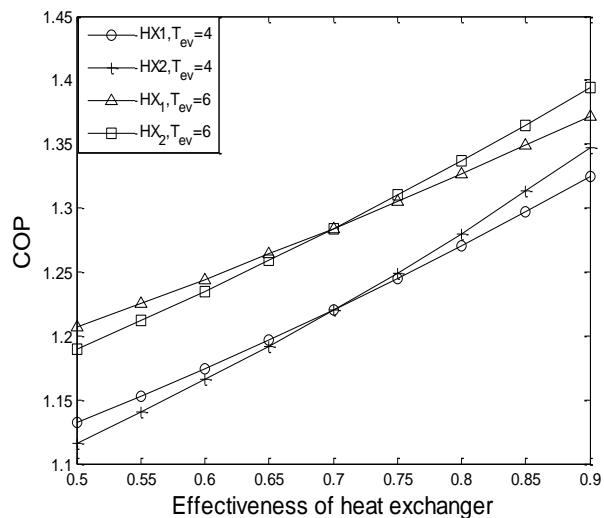
$$T_{Cout} = T_{Cin} + (\dot{Q}_{Collector} / \dot{m}_C C_p) \quad (10)$$

گرمای جذب شده در کلکتور از طریق مبدل حرارتی به تانک ذخیره منتقل می شود. در این پژوهش از هر گونه اتلاف حرارتی در اجزای سیستم صرف نظر شده است. با مشخص بودن دمای اولیه و حجم تانک ذخیره می توان دمای هر لحظه از تانک را بر اساس معادله ۱۱ تعیین کرد.

$$M_{Tank} C_p \frac{dT_{Tank}}{dt} = \dot{Q}_{Collector} - \dot{Q}_{HG} \quad (11)$$

گرم کن کمکی هنگامی به کار گرفته می شود که دمای تانک ذخیره از ۱۵۵ درجه سلسیوس پایین تر باشد. برای محاسبه انرژی مصرفی در گرم کن کمکی از رابطه ۱۲ استفاده شده است.

$$Q_{Aux} = M_{Tank} C_p (155 - T_{Tank}) \quad (12)$$



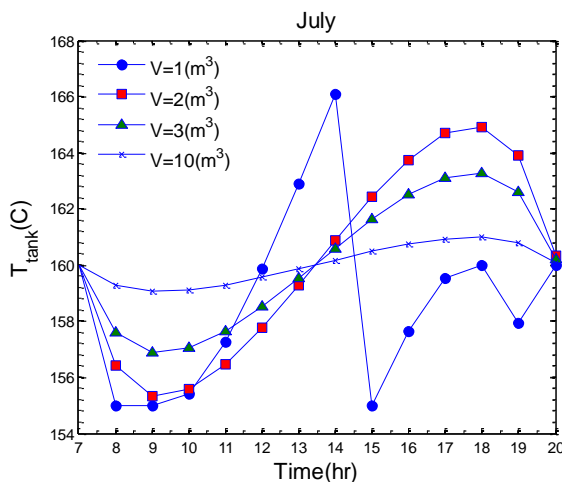
شکل ۴ نمودار تاثیر مبدل های حرارتی و ضریب عملکرد سیستم جذبی دو اثره

۱-۴- فرضیات در سیستم خورشیدی

به منظور مدل سازی سیستم خورشیدی نشان داده شده در شکل ۲ لازم است فرضیاتی در نظر گرفته شود که در زیر آورده شده است:

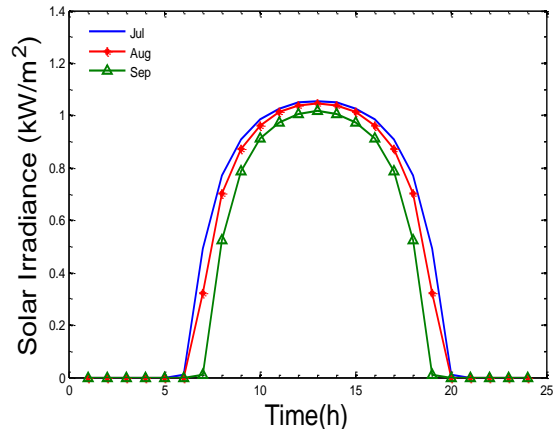
- ۱- دمای ورودی به کلکتور ثابت می باشد.
- ۲- ضریب انتقال حرارت و سطح مبدل حرارتی ثابت و برابر با ۲۴۰۰ وات بر کلوین می باشد.
- ۳- تانک ذخیره با مدل مخلوط کامل در این سیستم مورد استفاده شده است. در این حالت فرض می شود که سیال داخل تانک همیشه بصورت مخلوطی کامل و همگن است، در نتیجه تانک در دمای یکنواخت می باشد که فقط با زمان تغییر می کند، و نیز انتقال حرارت بصورت یک بعدی فرض می شود.
- ۴- سیستم کنترلی برای جلوگیری از کاهش اختلاف دمای بین خروجی کلکتور و تانک استفاده می شود. به طوری که اگر دمای خروجی کلکتور از دمای تانک ۶ درجه سلسیوس بیش تر باشد پمپ استفاده شده در بین تانک ذخیره و مبدل حرارتی روشن می باشد و در غیر این صورت خاموش می شود.
- ۵- دمای اولیه تانک ۱۶۰ درجه سلسیوس فرض شده است.

جذب شده در کلکتور، نسبت به انرژی مورد نیاز در ژنراتور، دمای تانک به شدت افت می‌کند و برای جلوگیری از افت دمای تانک از مقدار معین ۱۵۵ درجه سلسیوس از گرم‌کن کمکی استفاده شده است. هم‌چنین در ساعت ۱۴ به دلیل افزایش بیش از حد دمای تانک، انتقال حرارت بین کلکتور و تانک قطع شده است. از آن‌جا که باید در ساعت ۲۰ دمای تانک به مقدار دمای اولیه در شروع روز برسد، فرض شده است که اگر دمای تانک، در ساعت ۱۹ که تقریباً تابش خورشید در حال اتمام در آن روز می‌باشد کمتر از دمای اولیه باشد توسط گرم‌کن کمکی به تانک ذخیره انرژی گرمایی تزریق شود. با افزایش حجم تانک ذخیره به دو متر مکعب، تغییرات دمایی تانک با شب آرام‌تری می‌باشد به طوری که در این حالت در ساعات ابتدایی روز، دمای تانک از حد مجاز عبور نکرده و نیازی به گرم‌کن کمکی نمی‌باشد. با این حال در ساعت ۱۸ تقاطع دمایی در مبدل حرارتی اتفاق می‌افتد و به همین سبب ارتباط کلکتور و تانک ذخیره قطع می‌شود و این دلیلی می‌شود تا در ساعت ۱۹ دمای تانک کم‌تر از دمای اولیه باشد و در این حالت نیاز است از گرم‌کن کمکی، برای رسیدن به دمای اولیه در تانک استفاده شود. برای حجم سه متر مکعب دمای تانک همواره بالاتر از ۱۵۵ درجه سلسیوس است و به دلیل تغییرات ملایم دمای تانک، همواره بین کلکتور و تانک ذخیره انتقال حرارت صورت می‌گیرد. مشاهده می‌شود که در این حجم تانک نیازی به گرم‌کن حرارتی نمی‌باشد و در ساعت ۲۰ بدون هیچ گرمای اضافی و تنها با استفاده از انرژی خورشیدی، بار حرارتی مورد نیاز در ژنراتور فشار بالا تامین می‌شود. در حجم‌های بالاتر دمای تانک به پایداری می‌رسد و تغییرات دمای تانک بسیار کم می‌باشد. بنابراین می‌توان حجم تانک مناسب را سه متر مکعب برای ماه جولای تعیین کرد.

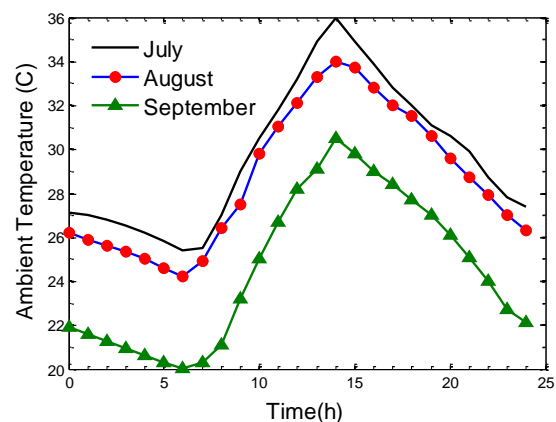


شکل ۷ تغییرات دمای تانک در طول روز برای ماه جولای در حجم‌های متفاوت تانک

در شکل ۸ تغییرات دمای تانک ذخیره در ماه اوت (مرداد ماه) نشان داده شده است. سطح کلکتور ۴۵٫۵ متر مربع برای این ماه بدست آمده است. بنابراین باید در این ماه به مجموعه کلکتور، گردآورنده خورشیدی به مساحت ۳ متر مربع نسبت به ماه قبل اضافه گردد. در این ماه نیز با انتخاب تانک ذخیره به حجم سه متر مکعب، نیازی به گرم‌کن کمکی نمی‌باشد.



شکل ۵ شدت تابش خورشید برای یک روز عادی در ماه‌های فصل تابستان



شکل ۶ دمای محیط برای یک روز عادی در ماه‌های فصل تابستان

۳-۴- نتایج و بحث سیستم خورشیدی

با توجه به فرضیات و معادلات حاکم در سیستم خورشیدی، شبیه‌سازی سیستم خورشیدی به منظور مشخص کردن سطح کلکتور و حجم تانک، با هدف کمینه نمودن انرژی مصرفی در گرم‌کن کمکی، در ماه‌های مختلف فصل تابستان در شهر تهران انجام شده است.

از آن‌جا که انرژی خورشیدی در طول ماه‌های مختلف فصل تابستان متغیر است از آرایش موازی برای کلکتورها استفاده شده است، تا در صورت لزوم تعدادی از آن‌ها به سیستم گردآورنده خورشیدی اضافه و یا از آن کم شوند. سطح هر کلکتور برای هر ماه بر اساس این‌که متوسط نسبت خورشیدی، که در معادله ۱۳ نشان داده شده، باید برابر یک شود تعیین می‌گردد.

$$SF = \sum_{Time=7}^{19} (\dot{Q}_{Collector} / \dot{Q}_{HG})_{Time} / 13 \quad (13)$$

در شکل ۷ تغییرات دمای تانک ذخیره در ماه جولای (تیر ماه) در حجم‌های متفاوت تانک ذخیره نشان داده شده است. با توجه به تابش خورشید در این ماه، سطح کلکتور ۴۲٫۵ متر مربع تعیین شده است، تا بدین ترتیب متوسط نسبت خورشیدی برابر یک شود. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در حجم یک متر مکعب، تغییرات دمای تانک زیاد می‌باشد. به طوری که در ابتدای روز به علت کم بودن شدت تابش و به تبع آن کم بودن انرژی

مصرف انرژی است، دمای مناسب برای ژنراتور فشار بالا ۱۳۰ درجه سلسیوس است. برای تامین انرژی مورد نیاز ژنراتور، در این پژوهش از سیستم خورشیدی استفاده شده است. کلکتورهای استفاده شده در این سیستم، از نوع سهمی شکل با محور ثابت می‌باشد. برای پایداری انرژی انتقال یافته از کلکتور به ژنراتور از تانک ذخیره استفاده شده است. از آنجا که متوسط گرمای جذب شده در کلکتور در هر ماه متغیر است، از آرایش موازی برای کلکتورها استفاده شده است. به این طریق در هر ماه، برای این که متوسط نسبت خورشیدی برابر یک شود، سطح کلکتور تعیین شده است. سطح کلکتور به ترتیب برای ماه‌های جولای، اوت و سپتامبر برابر با ۴۵،۵ و ۵۲،۵ مترمربع بدست آمده است. همچنین با آنالیز انجام شده برای تعیین حجم مناسب برای تانک ذخیره در هر ماه، مشخص شد که، حجم تانک ذخیره در ماه‌های جولای، اوت و سپتامبر باید به ترتیب از مقادیر ۳، ۳ و ۴ مترمکعب بیش تر باشد. بنابراین از آنجا که در حجم‌های بالاتر از مقادیر بدست آمده تغییرات دمای تانک کم و سیستم در حالت پایداری قرار دارد، حجم تانک ذخیره ۴ مترمکعب تعیین گردید.

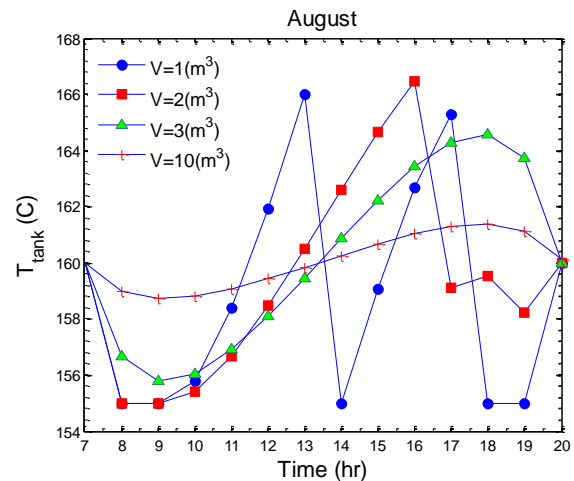
۶- فهرست علائم

| | |
|-----------|---|
| A | سطح (m^2) |
| COP | ضریب عملکرد |
| C_p | ظرفیت گرمایی در فشار ثابت $KJ/kg \cdot K$ |
| h | آنتالپی KJ/kg |
| I | شدت تابش خورشید W/m^2 |
| M | جرم تانک kg |
| \dot{m} | دبی جرمی kg/s |
| Q | انرژی گرمایی KJ |
| SF | نسبت خورشید |
| T | دما $^{\circ}C$ |
| t | زمان hr |
| x | غلظت محلول |

علائم یونانی

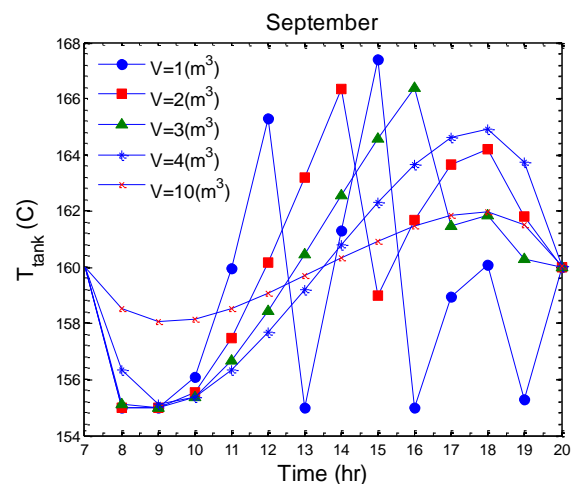
| | |
|---------------|---------------------------------|
| α | توزیع انرژی گرمایی در ژنراتورها |
| η | بازدهی کلکتور |
| ε | بازدهی مبدل حرارتی |
| زیر نویس‌ها | |
| amb | محیط |
| Aux | گرم‌کن کمکی |
| C | کلکتور |
| Cin | ورودی کلکتور |
| $Cout$ | خروجی کلکتور |
| EVA | اواپراتور |
| HG | ژنراتور فشار بالا |
| i | ورودی |
| LG | ژنراتور فشار پایین |
| o | خروجی |

۷- مراجع



شکل ۸ تغییرات دمای تانک در طول روز برای ماه اوت در حجم‌های متفاوت تانک

در شکل ۹ تغییرات دمای تانک ذخیره در طول روز برای ماه سپتامبر نمایش داده شده است. سطح کلکتور مناسب برای این ماه ۵۲،۵ مترمربع بدست آمده است. از شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که حجم مناسب برای تانک ذخیره در ماه سپتامبر، ۴ مترمکعب می‌باشد.



شکل ۸ تغییرات دمای تانک در طول روز برای ماه اوت در حجم‌های متفاوت تانک

از آنجا که مساحت کلکتور با آرایش موازی قابل کنترل است، می‌توان با سطح کل ۵۲،۵ که در هر ماه بنا به نیاز مساحت کلکتور در آن ماه تنظیم می‌شود، بار حرارتی مورد نیاز ژنراتور را، از کلکتور دریافت کرد. حجم تانک ذخیره مناسب برای تمامی ماه‌های فصل تابستان برابر با ۴ متر مکعب است، تا بدین طریق بدون استفاده از گرم‌کن کمکی، بار حرارتی مورد نیاز در ژنراتور تامین شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم سرمایش جذبی خورشیدی دو اثره لیتیم بروماید-آب، برای استفاده در شهر تهران در فصل تابستان، در نرم‌افزار EES شبیه‌سازی شده است. با بررسی سیستم جذبی مشخص شد که ضریب عملکرد سیستم با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا افزایش می‌یابد. شیب افزایش ضریب عملکرد، با افزایش دمای ژنراتور فشار بالا از مقدار ۱۳۰ درجه سلسیوس به بالا، بسیار کم است. از آنجا افزایش دمای ژنراتور بالا همراه با

- [۱] R. Ventas, A. Lecuona, C. Vereda, M. Legrand, Two-stage double-effect ammonia/lithium nitrate absorption cycle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. ۹۴, pp. ۲۲۸-۲۳۷, ۲۰۱۵.
- [۲] O. Ketfi, M. Merzouk, N. K. Merzouk, S. E. Metenan, Performance of a Single Effect Solar Absorption Cooling System (LiBr-H₂O), *Energy Procedia*, Vol. ۷۴, pp. ۱۳۰-۱۳۸, ۲۰۱۵.
- [۳] A.A. Al-Ugla, M.A.I. El-Shaarawi, S.A.M. Said, A.M. Al-Qutub, Techno-economic analysis of solar-assisted air-conditioning systems for commercial buildings in Saudi Arabia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. ۵۴, pp. ۱۳۰۱-۱۳۱۰, ۲۰۱۵.
- [۴] Y. Hang and M. Qu, The impact of hot and cold storages on a solar absorption cooling system for an office building, *International High Performance Buildings Conference*, pp. ۳۴۷-۳۵۵, ۲۰۱۰.
- [۵] R. Gomri, R. Hakimi, Second law analysis of double effect vapour absorption cooler system, *Energy Conversion and Management*, Vol. ۴۹, pp. ۳۳۴۳-۳۳۴۸, ۲۰۰۸.
- [۶] Z. Li, X. Ye, J. Liu, Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H₂O absorption cooling system in subtropical city, *Energy Conversion and Management*, No. ۸۵, pp. ۳۰۲-۳۱۲, ۲۰۱۴.
- [۷] م. عربی و م. دهقانی، بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های چیلر جذبی خورشیدی در ایران، *مجله مهندسی شیمی ایران*، سال نهم، شماره چهل و ششم، ۱۳۸۹.
- [۸] Q. P. Ha, V. Vakiloroyaya, A New Single-Effect Hot-Water Absorption Chiller Air Conditioner using Solar Energy, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, ۲۰۱۳.
- [۹] آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، سازمان هواشناسی کشور