

بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های چیلر جذبی خورشیدی در ایران

مهسا عربی، محمدرضا دهقانی*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: m_dehghani@iust.ac.ir

چکیده

با توجه به بحران انرژی در سال‌های اخیر به ویژه در فصل تابستان و محدود بودن منابع سوختی و نیز آلاینده‌گی آنها، انرژی خورشیدی یکی از منابعی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به انرژی دریافتی قابل ملاحظه‌ی زمین از خورشید می‌توانیم با بهره‌گیری مناسب از این انرژی در سیستم‌های تبرید، بار سرمایشی مورد نیاز خانه‌ها را در تابستان و همچنین بار گرمایشی مورد نیاز در زمستان را تأمین کنیم. در این مقاله عملکرد چیلرهای جذبی خورشیدی بررسی شد. سیستم مورد مطالعه، شامل یک چیلر جذبی آمونیاکی با حداکثر ظرفیت ۲/۵ تن تبرید و ۳۰ عدد کلکتور خورشیدی از نوع لوله‌های خلاء شده می‌باشد. با استفاده از اطلاعات هواشناسی کشور، گرمای جذب شده توسط این کلکتورها در هر منطقه محاسبه شده و پس از ترکیب با سیستم چیلر جذبی خورشیدی شبیه‌سازی گردید. مقدار سرمایش ایجاد شده با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، در نقاط مختلف کشور محاسبه شده و در نهایت، تأثیر پارامترهای مختلف بر بازدهی این سیکل مورد بررسی قرار گرفته و هزینه‌های سیستم طراحی شده با هزینه‌های چیلرهای تراکمی موجود مقایسه گردید.

کلمات کلیدی: چیلر جذبی، انرژی خورشیدی، سیکل تبرید، سرمایش

۱- مقدمه

همچنین در ۱۰۰ سال اخیر، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به بالاتر رفتن غلظت اتمسفری دی‌اکسیدکربن تا ۳۰٪ شده تا آنجا که ۴۲٪ از انرژی مورد نیاز از سوخت‌های فسیلی (نفت و گاز و...) تأمین می‌شود و پیش بینی شده است تا سال ۲۰۱۰ میلادی، آسیا به بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در دنیا تبدیل خواهد شد. این ارقام نشان می‌دهند که میزان مصرف انرژی جهان در قرن حاضر بالا می‌باشد و بالطبع این سوال مهم مطرح است که آیا منابع انرژی‌های فسیلی در قرن‌های آینده، جوابگوی نیاز انرژی جهان برای بقا، تکامل و توسعه خواهند بود یا خیر؟

طبق آمارهای به ثبت رسیده طی ۳۰ سال گذشته نیاز انرژی جهان به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در سال ۱۹۶۰ مصرف انرژی جهان معادل 1 Gtoe ^۱ بوده است. در سال ۱۹۹۰ این رقم به $8/8 \text{ Gtoe}$ بالغ گردید که دارای رشد متوسط سالانه ۳/۳ درصد است و در مجموع، ۱۶۶ درصد افزایش نشان می‌دهد و در حال حاضر مصرف انرژی جهان (Gtoe/Year) ۱۰ است و پیش بینی می‌شود این رقم در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به ۱۲ و 14 (Gtoe/Year) افزایش یابد. [۱]

1. Giga tonnes of equivalent oil

این عوامل (بحران انرژی و پایان پذیری منابع فسیلی به همراه آلودگی ناشی از استفاده نادرست از این منابع) از جمله عوامل محرک بشر به منظور دستیابی بر سرچشمه‌های انرژی فناناپذیری چون خورشید، باد و سایر منابع انرژی می‌باشد که در عرض دهه گذشته اهمیت بیشتری یافته است.

در کشور ما نیز ۴۰٪ سوخت مصرفی به بخش ساختمان اختصاص داده شده که در کنار هزینه‌های بالای آن برای مصرف کننده، با خطر رو به اتمام بودن منابع و آلودگی محیط زیست همراه است که این مهم استفاده از سرچشمه‌های تجدیدپذیر انرژی را واجب می‌سازد. از آنجا که استفاده از این انرژی‌های تجدیدپذیر منجر به تولید مقادیر بسیار ناچیزی و در برخی موارد، عدم تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود، لذا یکی از سوخت‌هایی که به زودی در دنیا رتبه اول مصرف را به خود اختصاص می‌دهد، انرژی خورشیدی است.

با توجه به این که بخش بزرگی از انرژی الکتریکی مصرفی در فصل تابستان به سرمایه‌های 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. به طور کلی می‌توان چیلرها را به دو دسته چیلرهای تراکمی و چیلرهای جذبی تقسیم کرد. چیلرهای تراکمی از انرژی الکتریکی و چیلرهای جذبی از انرژی حرارتی به عنوان منبع اصلی برای ایجاد سرمایش استفاده می‌کنند. سیکل تبرید جذبی اساس کار چیلرهای خورشیدی است. در این سیکل، گرمای مورد نیاز ژنراتور از انرژی خورشیدی تأمین می‌شود. از زمان ابداع این سیکل، چیلرهای جذبی گوناگونی ساخته شده‌اند. در چیلرهای جذبی اولیه از آمونیاک به عنوان ماده جاذب استفاده می‌شد که به علت سمی و خورنده بودن در سال‌های بعد، لیتیم بروماید به عنوان جایگزینی برای آن مطرح شد ولی مشکل عمده‌ی لیتیم بروماید، کریستالیزاسیون آن است که در اثر غلظت خیلی زیاد یا افت دمای شدید محلول ممکن است پیش آید. همچنین مبرد سیستم‌های لیتیم برومایدی، آب است که پایین‌تر از صفر درجه سانتیگراد منجمد می‌شود و مسیر جریان را مسدود می‌کند. لذا این سیستم‌ها نمی‌توانند دماهای خیلی پایین ایجاد کنند و از این نظر محدودیت دارند. امروزه سیستم‌هایی با جاذب جامد مانند سلیکاژل نیز مورد مطالعه قرار گرفته و در حال پیشرفت‌اند. همانطور که اشاره شد در چیلرهای جذبی برای به حرکت در آوردن سیال عامل از انرژی حرارتی

استفاده می‌شود. این انرژی حرارتی می‌تواند توسط بخار آب، آب داغ ناشی از احتراق مستقیم سوخت و یا انرژی خورشیدی تأمین گردد.

فناوری تبرید جذبی روشی عالی برای تهیه مطبوع مرکزی در تأسیساتی است که ظرفیت دیگ اضافی دارند و می‌توانند بخار یا آب داغ مورد نیاز برای راه اندازی چیلر را تأمین نمایند. چیلرهای جذبی قادر به تولید ۲ تا ۱۲۰۰ تن برودت هستند. البته قابل ذکر است که برخی از تولیدکنندگان ژاپنی موفق شده‌اند چیلرهای جذبی با ظرفیت معادل ۵۰۰۰ تن نیز تولید کنند. مشکلات عمده‌ای که این سیستم‌های خورشیدی دارا هستند عبارتند از: هزینه‌ی اولیه‌ی بالا، بهره‌گیری از انرژی خورشیدی فقط برای یک مدت کوتاه در طول روز و کارایی نسبتاً پایین [۴]. البته با پیشرفت‌های جدید در زمینه‌های سردسازی و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، ضریب عملکرد ۱ و حتی بیشتر هم قابل دسترسی است. واحدهای تجاری امروزه به ضریب عملکردی تا حدود ۱/۳۵ برای دستگاه‌های دو مرحله‌ای با جریان موازی، دست یافته‌اند (شرکت اپارای^۱ ژاپن). [۵]

هزینه‌ی نصب چیلرهای خورشیدی از چیلرهای تراکمی بسیار بیشتر است ولی این امر با توجه به هزینه‌ی عملیاتی کمتر چیلرهای خورشیدی یعنی مصرف برق کمتر، تا حدودی جبران می‌شود. کلکتورهای خورشیدی بخش اصلی هزینه‌ی ساخت این چیلرها را به خود اختصاص می‌دهند، ولی با توجه به رشد تکنولوژی و تولید در مقیاس بالا این هزینه‌ها نیز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، چیلرهای جذبی بر خلاف چیلرهای تراکمی از هیچ گونه ماده *CFC* یا *HCFC* که موجب تخریب لایه‌ی ازن می‌شوند، استفاده نمی‌کنند و لذا برای محیط زیست خطری ایجاد نمی‌نمایند. این موارد باعث می‌شوند که باور کنیم چیلرهای خورشیدی به زودی قابل رقابت با چیلرهای تراکمی موجود خواهند شد. [۶]

در این مقاله با استفاده از یک نرم افزار یک سیستم چیلر جذبی خورشیدی شبیه‌سازی شد و با استفاده از اطلاعات هواشناسی هر منطقه، مقدار گرمای جذب شده توسط کلکتورها محاسبه شده و با توجه به آن، مقدار سرمایش ایجاد شده توسط این سیستم در نقاط مختلف کشور در فصل تابستان محاسبه گردید. سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب عملکرد این سیکل مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، سیستم بهینه انتخاب شد و چیلرهای خورشیدی از نظر هزینه با چیلرهای تراکمی موجود مقایسه شدند.

1. Ebara

۲- شرح فرایند سردسازی جذبی - خورشیدی

در یک تقسیم‌بندی عمومی می‌توان چیلرهای جذبی را به دو دسته‌ی چیلرهای جذبی با جاذب جامد مانند سیستم‌های سلیکاژل و آب و چیلرهای جذبی با جاذب مایع مانند سیستم‌های لیتیم بروماید و آب و نیز آب و آمونیاک طبقه‌بندی کرد. در واقع در هر سیکل تبرید جذبی یک ماده‌ی جاذب و یک سیال مبرد وجود دارد که تقسیم‌بندی فوق بر این مبنا انجام شده است. در سیستم آب و آمونیاک، سیال مبرد، آمونیاک و سیال جاذب، آب است. در سیستم لیتیم بروماید و آب، سیال مبرد، آب و سیال جاذب، محلول لیتیم بروماید است.

تفاوت سیکل تبرید جذبی با سیکل تبرید تراکم بخار در نحوه‌ی تراکم سیال است. در این سیکل، تراکم محلول مبرد در پمپ صورت می‌گیرد. در صورتی که در سیکل تراکمی، کار در یک کمپرسور انجام می‌شود و بخار متراکم می‌گردد. ویژگی برجسته‌ی سیستم جذبی آن است که این سیستم تبرید فقط به مقدار اندکی کار نیازمند است، زیرا فرایند پمپ کردن فقط برای مایع صورت می‌گیرد.

سیستم مورد مطالعه، شامل یک چیلر جذبی آمونیاکی با ظرفیت 900 و 30 عدد کلکتور خورشیدی از نوع لوله‌های خلاء شده مدل AP30 ساخت شرکت^۱، یک برج خنک‌کن و یک مخزن ذخیره‌ی آب است.

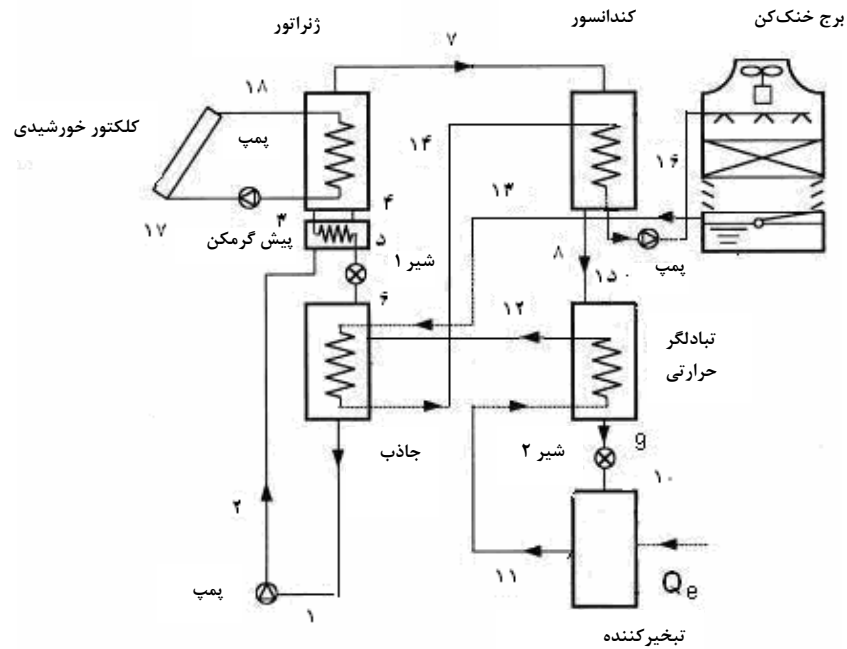
کلکتور یا گردآورنده‌ی خورشیدی دستگاهی است که برای جمع‌آوری انرژی حرارتی خورشید و انتقال و ذخیره‌ی آن در محل بهره‌برداری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کلکتورها انواع مختلفی دارند و به اشکال گوناگون طبقه‌بندی می‌شوند. در ساده‌ترین طبقه‌بندی، کلکتورها به دو دسته‌ی: الف- کلکتورهای تخت و ب- کلکتورهای متمرکزکننده تقسیم‌بندی می‌شوند. در این اواخر برای سیستم‌های تبرید از کلکتورهای نوع لوله‌های خلاء شده که یکی از انواع کلکتورهای تخت هستند، استفاده می‌شود. این کلکتورها در دماهای کم تا متوسط، یعنی، ماکزیمم تا حدود 170°C عمل می‌کنند و بازدهی بالایی دارند. این مدل کلکتور از لوله‌های شیشه‌ای تشکیل شده است که صفحه‌ی جاذب را در بر می‌گیرند. برای کاهش هر چه بیشتر افت حرارتی، در محفظه‌ی داخلی این لوله‌ها، خلاء ایجاد می‌کنند. پس از برخورد

1. Apricus

پرتوهای خورشید به صفحه‌ی جاذب‌کننده در درون استوانه، انرژی خورشیدی تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود و انرژی حرارتی از طریق صفحه‌ی جاذب به لوله و سپس به سیال عامل درون لوله که معمولاً آب است منتقل می‌گردد. [7]

چیلر جذبی نیز از پمپ، ژنراتور، چگالنده، شیر انبساط، تبخیرکننده و پیش‌گرمکن تشکیل شده است (شکل شماره ۱). در این چیلر جذبی، محلول غلیظ مایع حاوی آب و آمونیاک تا فشار زیاد توسط یک پمپ مایع، به پیش‌گرمکن پمپ می‌شود و فشار و دمای آن بالا می‌رود و پس از آن وارد ژنراتور می‌شود. در این شرایط، در اثر انتقال گرما از منبع دارای دمای بالا، بخار آمونیاک از محلول جدا می‌شود. همانطور که اشاره شد گرمای مورد نیاز ژنراتور از انرژی خورشیدی تأمین می‌شود. مقدار تابش رسیده به سطح کلکتور به ارتفاع، عرض جغرافیایی، مدت تابش آفتاب، تعداد ساعات ابری و آلودگی هوا بستگی دارد. 30 عدد کلکتور از نوع لوله‌های خلاء شده با سطح جاذب $2/4$ متر مربع در 6 ردیف 5 تایی، کنار هم قرار گرفته، انرژی خورشیدی را جمع‌آوری کرده و گرمای خود را به آبی که در این کلکتورها جریان دارد می‌دهند این آب، وارد کویل (مارپیچ) حرارتی ژنراتور می‌شود و در اثر تبادل حرارت، گرمای خود را به محلول می‌دهد. سپس آمونیاک وارد چگالنده شده و در آن جا چگالیده می‌شود (مانند سیستم تراکم بخار) و سپس به شیر انبساط و تبخیرکننده راه می‌یابد. در تبخیرکننده، محلول تبخیر می‌شود که گرمای مورد نیاز خود را به طور غیرمستقیم از محیط می‌گیرد که همان بار سرمایشی مورد نیاز برای تهویه‌ی ساختمان است. بخار آمونیاک در فشار پایین از تبخیرکننده خارج می‌شود، از تبادلگر حرارتی عبور می‌کند و وارد جاذب می‌شود و توسط محلول رقیق آمونیاک جذب می‌گردد. این فرایند در دمای اندکی بالاتر از محیط صورت می‌گیرد و باید در طی این فرایند مقداری گرما به محیط انتقال یابد. در واقع با بازگشت محلول رقیق آمونیاک به جاذب، سیکل کامل می‌شود. مشخصات کامل جریان‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

شبیه‌سازی از روی داده‌های تجربی موجود انجام شد [۸]. مینیمم انحراف در دمای جریان 2 مشاهده شد که مساوی $0/5$ درصد و ماکزیمم انحراف در دمای جریان 4 مشاهده شد که 10 درصد است.



شکل ۱- یک سیکل جذبی خورشیدی

جدول ۱- مشخصات جریان‌های چیلر خورشیدی ۲٫۵ تن تبرید

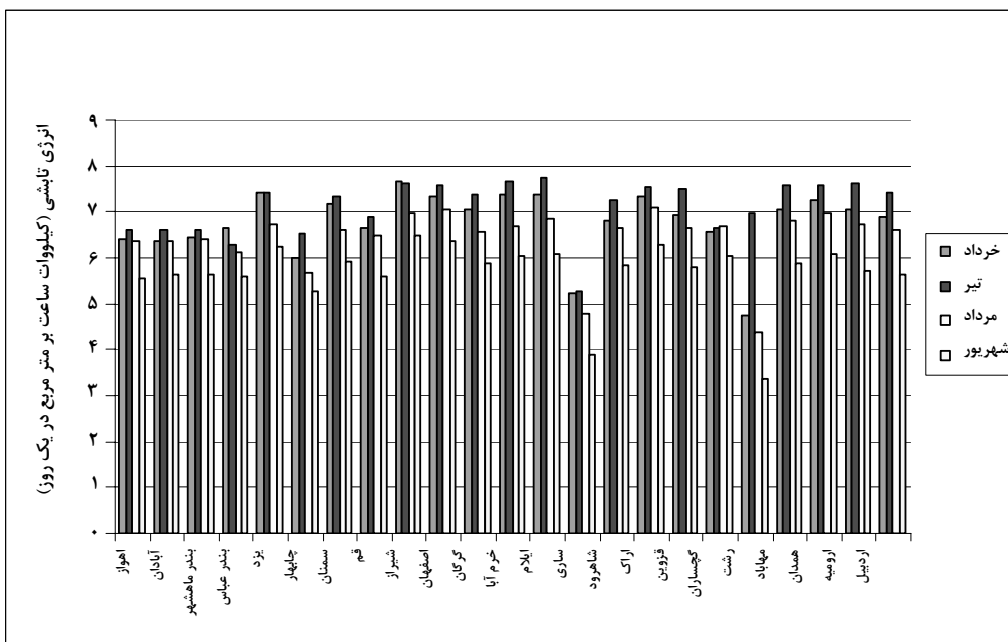
شماره جریان	شدت جریان (kg/min)	درصد وزنی NH ₃ در آب	دما (° C)	فشار (bar)
۱	۱۵	۴۱	۲۷	۲/۵۱۲
۲	۱۵	۴۱	۲۷/۱۴	۱۴
۳	۱۵	۴۱	۸۷	۱۴
۴	۱۴/۵	۳۸	۸۹	۱۴
۵	۱۴/۵	۳۸	۳۰/۵۱	۱۴
۶	۱۴/۵	۳۸	۳۰/۰۵	۲/۵۱۲
۷	۰/۵	۹۹/۸۵	۵۳/۴۴	۱۴
۸	۰/۵	۹۹/۸۵	۳۴	۱۴
۹	۰/۵	۹۹/۸۵	۳۰	۱۴
۱۰	۰/۵	۹۹/۸۵	-۱۳	۲/۵۱۲
۱۱	۰/۵	۹۹/۸۵	۸/۵	۲/۵۱۲
۱۲	۰/۵	۹۹/۸۵	۱۶/۵۲	۲/۵۱۲
۱۳	۵۰	۰	۲۹	۱
۱۴	۵۰	۰	۳۱/۷	۱
۱۵	۵۰	۰	۳۱/۷	۱
۱۶	۵۰	۰	۲۵	۱
۱۷	۱۷/۸۱	۰	۹۰	۱
۱۸	۱۷/۸۱	۰	۹۹	۱

۱-۲ محاسبه پتانسیل جذب انرژی تابشی در ایران

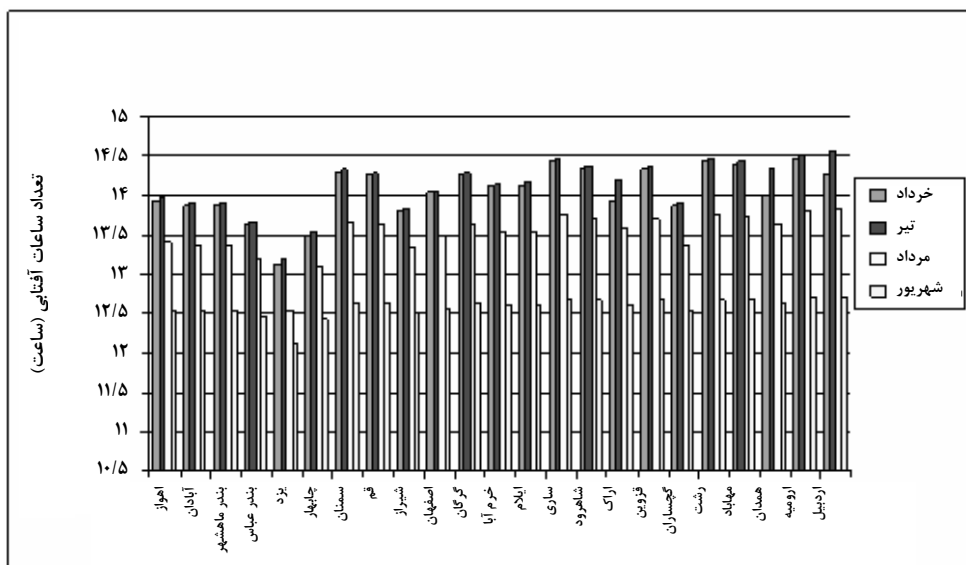
ابتدا با استفاده از اطلاعات هواشناسی که مقدار تابش را در هر منطقه برحسب ($kWh/m^2.day$) و همچنین تعداد ساعات آفتابی را در هر روز ارائه می‌دهند، مقدار انرژی خورشیدی تاییده به هر منطقه برحسب

(kW/m^2) محاسبه شد و با داشتن دمای هوا و مقدار تابش به دست

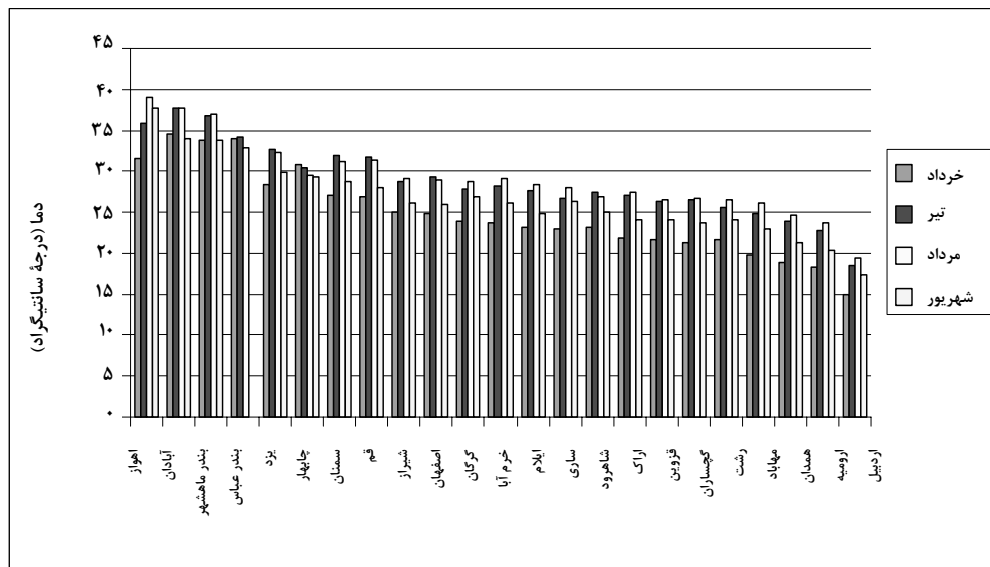
آمده، بازدهی کلکتورهای خورشیدی قابل محاسبه خواهد شد. اطلاعات استفاده شده در این پژوهش به صورت نمودارهای (۱) تا (۳) ارائه شده‌اند:



نمودار ۱- متوسط ماهیانه‌ی انرژی تابشی رسیده به شهرهای مختلف ایران [۲]



نمودار ۲- متوسط ماهیانه‌ی تعداد ساعات آفتابی در هر روز در شهرهای مختلف ایران [۲]



نمودار ۳- متوسط ماهیانه‌ی دما در شهرهای مختلف ایران [۳]

در روابط بالا به ترتیب:

$$G(\text{W/m}^2): \text{انرژی خورشیدی تابیده به واحد سطح کلکتور}$$

$$T_a: \text{دمای محیط}$$

$$T_{outlet}: \text{دمای آب خروجی از کلکتور}$$

$$T_{inlet}: \text{دمای آب ورودی به کلکتور است.}$$

با استفاده از روابط بالا، بازدهی کلکتور قابل محاسبه خواهد بود. در نمودار (۴) تغییرات بازدهی کلکتور بر حسب اختلاف دمای آب و دمای محیط در سه تابش مختلف رسم شده است.

از آنجائیکه با افزایش دمای محیط و نیز کاهش دمای آب موجود در کلکتور تلفات حرارتی، کاهش می‌یابد، بازدهی کلکتور با افزایش دمای محیط و کاهش دمای متوسط آب، افزایش خواهد یافت. با محاسبه‌ی بازدهی و با داشتن مقدار تابش در شهرهای مختلف کشور، در چهار ماه گرم سال یعنی خرداد، تیر، مرداد و شهریور، گرمایی را که هر کلکتور به آب می‌دهد محاسبه می‌کنیم:

$$G_a = G \times \eta \quad (4)$$

مشخص است که در تیرماه تعداد ساعات آفتابی بیشتر و در نتیجه، میزان انرژی دریافتی از خورشید نیز ماکزیمم است ولی دمای هوا در مرداد ماه بالاتر است. این دو، یعنی، دمای بالا و تابش زیاد، دو عامل مطلوب در بهبود بازدهی کلکتور هستند.

۲-۲ بازدهی کلکتور خورشیدی

نسبت گرمای داده شده به آب به میزان تابش رسیده به سطح کلکتور، به عنوان بازدهی کلکتور خورشیدی تعریف می‌شود. شرکت‌های سازنده معمولاً از رابطه (۱) الی (۳) برای محاسبه‌ی بازدهی استفاده می‌کنند. [۹]

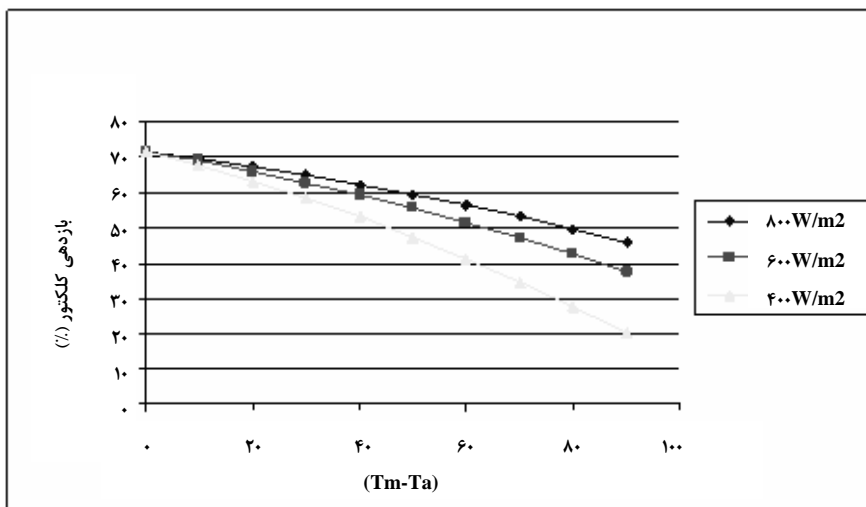
$$\eta(x) = \eta_0(x) - a_1 \times x - a_2 \times G \times x^2 \quad (1)$$

$$x = (T_m - T_a) / G \quad (2)$$

$$T_m = (T_{inlet} + T_{outlet}) / 2 \quad (3)$$

$$\eta_0(x) = 0.717 \quad , \quad a_1 = 1.52 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

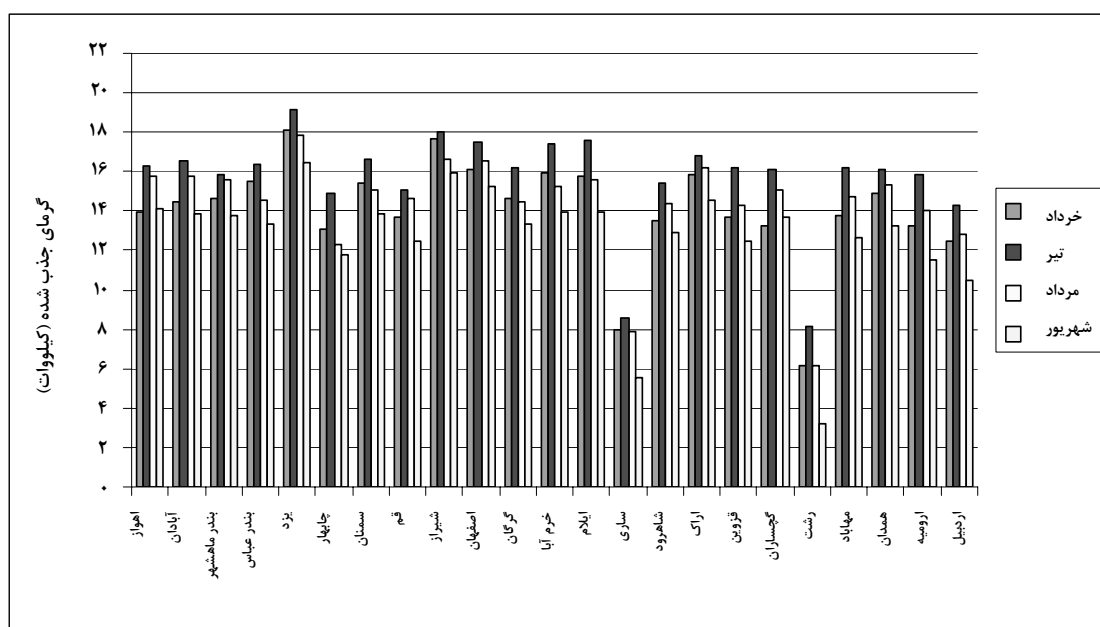
$$a_2 = 0.0085 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$$



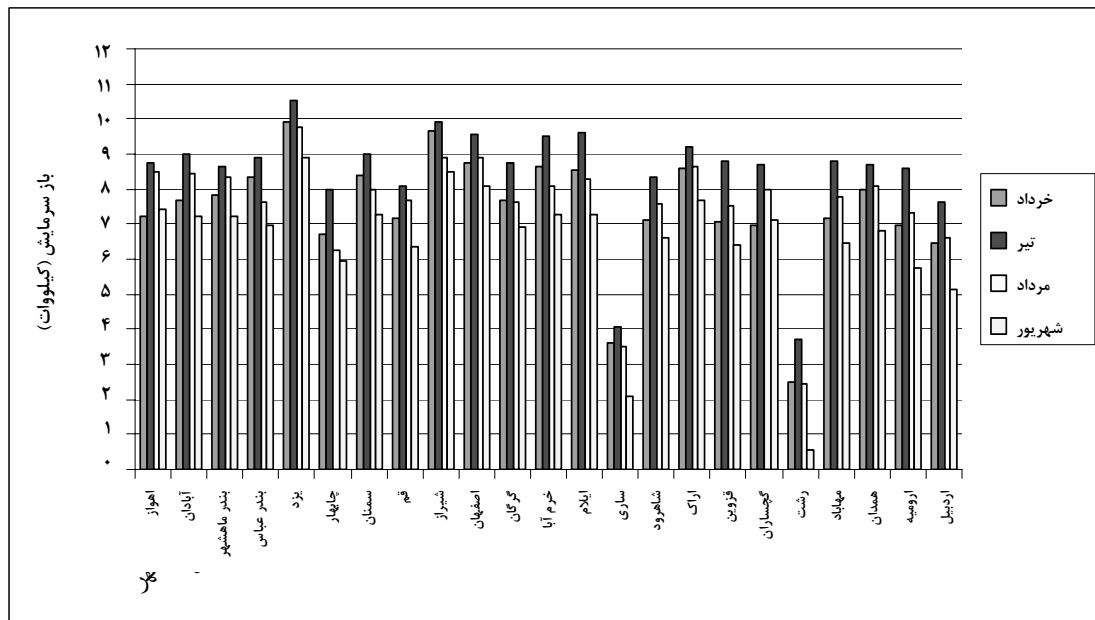
نمودار ۴- بازدهی کلکتور بر حسب اختلاف دمای متوسط آب و دمای محیط

مقدار گرمای داده شده به ژنراتور یعنی Q_g است. نتایج محاسبات و مقدار سرمایش قابل حصول از نتایج شبیه‌سازی به صورت نمودارهای (۵) و (۶) در زیر ارائه شده‌اند.

در رابطه (۴) G_a (W/m^2) گرمایی است که کلکتور به آب می‌دهد. با صرف‌نظر از اتلاف حرارتی در مخزن ذخیره‌ی آب، می‌توان فرض کرد که G_a یعنی کل گرمایی را که آب از کلکتور می‌گیرد، مساوی



نمودار ۵- متوسط توان تابشی جذب شده در شهرهای مختلف ایران



نمودار ۶- متوسط توان سرمایشی ایجاد شده در شهرهای مختلف ایران

ضریب عملکرد یا COP^۱ تعریف می‌شود که عبارتست از نسبت گرمای گرفته شده در تبخیرکننده به انرژی ورودی به سیکل جذبی.

$$COP = Q_e / (Q_p + Q_g) \quad (۵)$$

Q_e : گرمای گرفته شده در تبخیرکننده

Q_p : گرمای معادل کار پمپ

Q_g : گرمای داده شده در ژنراتور

از آنجائیکه کار پمپ در این سیکل‌ها عملاً ناچیز است می‌توان از مقدار آن در مقایسه با سایر جمله‌ها صرف نظر کرد. بنابراین رابطه (۵) را می‌توان به شکل زیر مرتب نمود:

$$COP = Q_e / Q_g \quad (۶)$$

ضریب عملکرد برای شهرهای مختلف در نمودار (۷) آمده است:

۳- بررسی پارامترهای فرایندی بر ضریب عملکرد سیکل

با استفاده از قابلیت‌های فرایندی نرم افزار HYSYS، تأثیر پارامترهای

به این ترتیب، مقدار گرمایی که این کلکتورها در هر نقطه از کشور می‌توانند جذب کنند به دست آمده است و با قرار دادن این مقادیر به عنوان Q_g در شبیه‌سازی، مقدار سرمایش ایجاد شده (Q_e)، پیش‌بینی گردید.

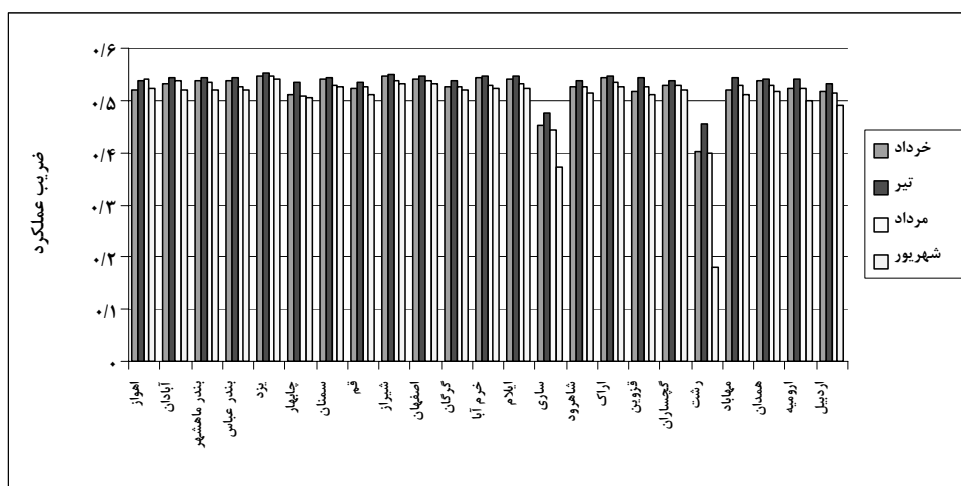
همانطور که از نمودار (۴) مشخص است بازدهی کلکتور با افزایش دمای محیط، افزایش می‌یابد. همچنین، نمودارهای بازدهی برحسب اختلاف دمای آب و محیط، برای نمونه در تابش‌های ۶۰۰ و ۷۰۰ و $800 (W/m^2)$ رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که در یک اختلاف دمای مشخص، نمودار بازدهی در $800 (W/m^2)$ بالاتر از $700 (W/m^2)$ و آن نیز بالاتر از $600 (W/m^2)$ است و این بدان معناست که بازدهی کلکتور با افزایش تابش رسیده به سطح آن، افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن همزمان دو پارامتر دما و انرژی تابشی می‌توان نتیجه گرفت که در شهرهایی مانند یزد و شیراز، که دمای هوا بالاتر و میزان تابش بیشتر است کلکتورها انرژی حرارتی بیشتری را برای مصرف ژنراتور می‌توانند تأمین کنند و در شهرهایی مثل ساری و رشت که معمولاً هوای ابری دارند و انرژی تابشی اندکی به آنها می‌رسد حرارت ورودی به ژنراتور نیز اندک است. این امر به وضوح در نمودار (۵) مشخص است.

مشابه سیکل‌های تبرید تراکمی، برای سیکل‌های تبرید جذبی نیز

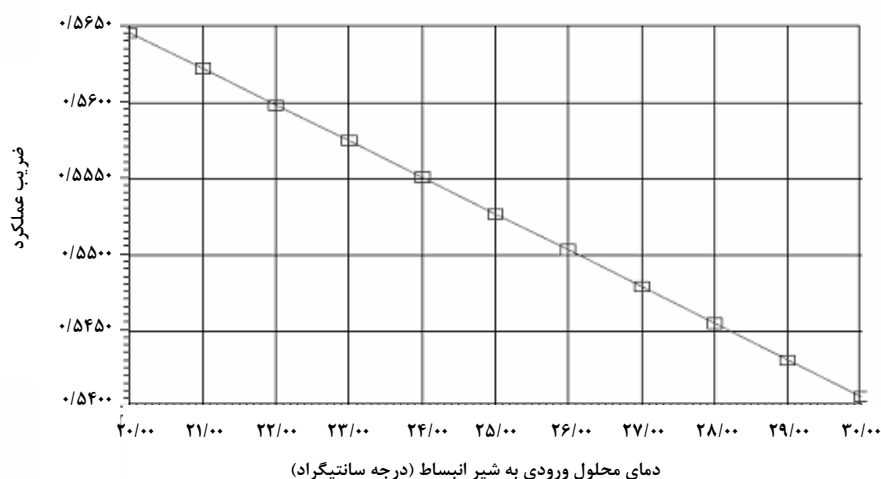
1. Coefficient of Performance

ثابت تعریف شده برای ژنراتور، مقدار بیشتری آمونیاک، از بالای برج خارج می‌شود و این آمونیاک برای تبخیر، به گرمای بیشتری در تبخیرکننده احتیاج خواهد داشت. با افزایش Q_e و با توجه به رابطه‌ی مستقیم آن با ضریب عملکرد، ضریب عملکرد افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل نیز مشخص است با یک افزایش کوچک در دمای ورودی ژنراتور، ضریب عملکرد سیکل به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و این پارامتر، مهمترین پارامتر در تعیین بازدهی سیکل‌های جذبی خورشیدی است ولی این دما از یک حدی نمی‌تواند بیشتر شود زیرا با افزایش آن، دمای تحتانی ژنراتور نیز افزایش می‌یابد و با آب خروجی از کلکتورها نمی‌توان آن را گرم کرد.

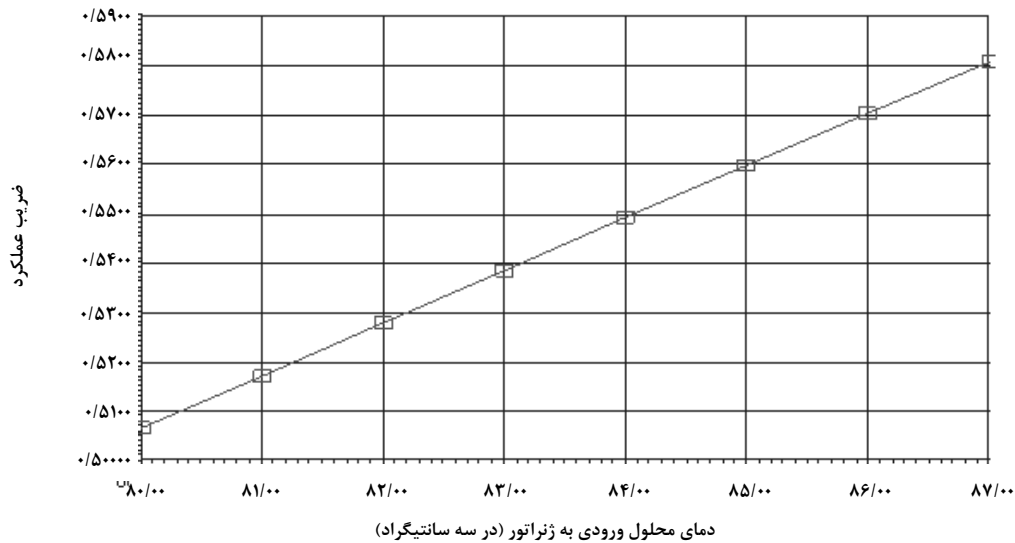
مهم بر ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش سیکل مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن در نمودارهای (۸) تا (۱۱) ارائه شده‌اند. همانطور که از نمودار (۸) می‌توان استنباط کرد با افزایش دمای ورودی به شیر انبساط، ضریب عملکرد کاهش می‌یابد زیرا در یک تغییر فشار ثابت با افزایش دمای ورودی به شیر، دمای خروجی آن، که همان دمای ورودی به تبخیرکننده است نیز زیاد می‌شود و آمونیاک برای تبخیرشدن در تبخیرکننده گرمای کمتری می‌گیرد. به این ترتیب با کاهش Q_e ، ضریب عملکرد کاهش می‌یابد. با افزایش دمای محلول ورودی به ژنراتور، ضریب عملکرد سیکل زیاد می‌شود. در واقع، با افزایش دمای محلول ورودی به ژنراتور، در یک Q_g



نمودار ۷- ضریب عملکرد در شهرهای مختلف ایران



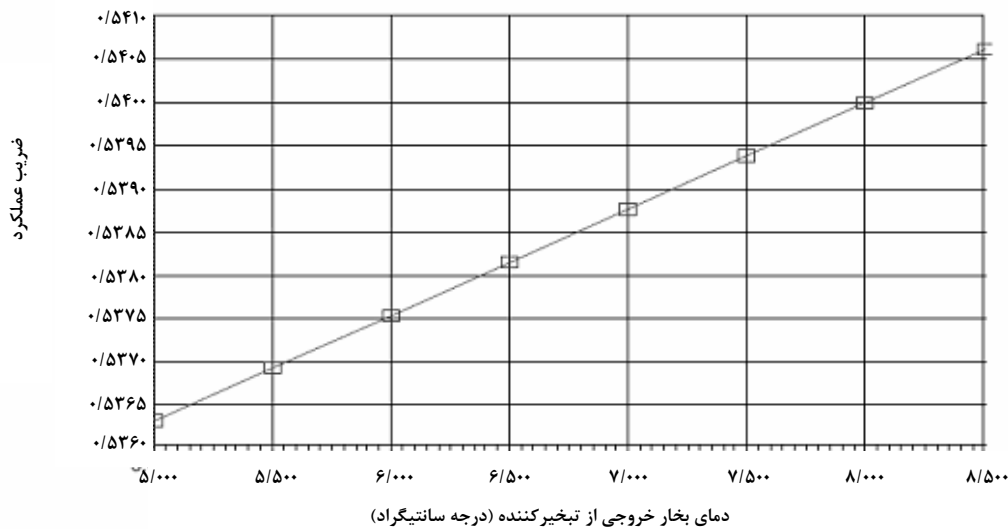
نمودار ۸- ضریب عملکرد سیکل بر حسب دمای محلول ورودی به شیر انبساط



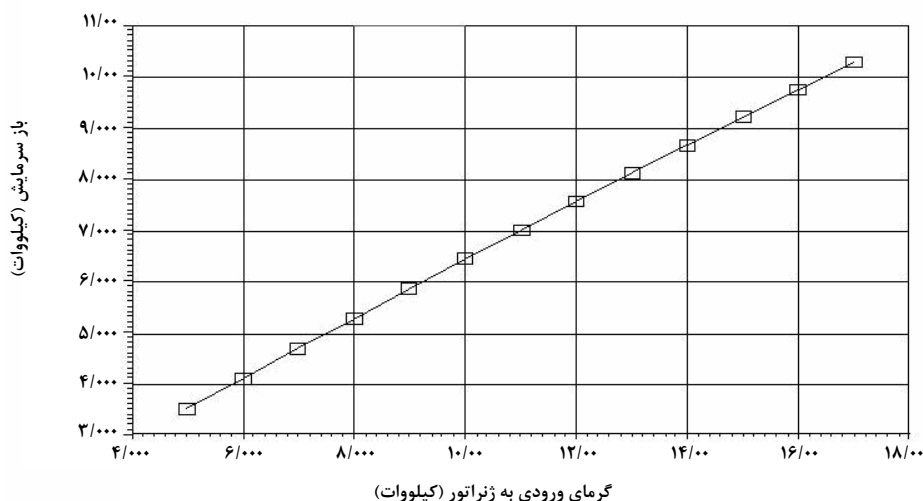
نمودار ۹- ضریب عملکرد سیکل بر حسب دمای محلول ورودی به ژنراتور

همچنین، از نمودار (۱۱) برداشت می‌شود که با افزایش گرمای ورودی به ژنراتور، بار سرمایشی نیز افزایش می‌یابد، هر جا که انرژی جذب شده بیشتر است بار سرمایشی نیز زیادتر است.

با افزایش دمای خروجی از تبخیرکننده، بازدهی سیکل افزایش می‌یابد (نمودار ۱۰)، زیرا با یک دمای ورودی ثابت، با افزایش دمای خروجی، انتقال گرما در تبخیرکننده زیاد می‌شود.



نمودار ۱۰- ضریب عملکرد سیکل بر حسب دمای بخار خروجی از تبخیرکننده



نمودار ۱۱- مقدار سرمایه‌ش ایجاد شده بر حسب گرمای ورودی به ژنراتور

جدول ۲- هزینه‌ی اولیه‌ی چیلر خورشیدی

هزینه کل	تجهیزات
۸۷۵\$	پکیج (بسته) آمونیاکی
۱۲۶۰۰\$	کلکتور خورشیدی
۱۲\$	مخزن ذخیره‌ی آب
۷۵\$	دستگاه کنترلی
۲۶۸\$	پمپ
۲۶۰\$	برج خنک‌کننده
۲۰۰\$	نصب کامل تجهیزات با سیستم کنترلی و لوله‌کشی

هزینه‌های جاری این سیستم هزینه‌ی الکتریسیته و هزینه‌ی تعمیرات است اگر فرض کنیم که این چیلر، ۳ ماه تیر، مرداد و شهریور به طور مداوم کار کند بنابراین حدود $۳ \times ۳۱ \times ۲۴ = ۲۲۳۲$ ساعت در سال، برق مصرف می‌کند. قیمت هر کیلووات ساعت برق در ایران ۷۷۳ ریال است که تقریباً معادل $۰/۰۸$ \$ می‌باشد. هزینه‌ی کل مصرف برق در یک سال، در جدول زیر آمده است:

این نتیجه از مقایسه‌ی دو نمودار (۵) و (۶) نیز به دست می‌آید. همچنین از مقایسه‌ی دو نمودار (۷) و (۵) برداشت می‌شود که هرچه گرمای ورودی به ژنراتور افزایش یابد، بازدهی سیکل نیز افزایش پیدا می‌کند. پس به طور کلی، نتیجه‌گیری می‌شود که چیلرهای خورشیدی در جاهای گرم و خشک بهتر عمل می‌کنند و سرمایه‌ش بیشتری نیز تولید می‌کنند و در نواحی سرد و مرطوب که تابش کم است این تعداد کلکتور نمی‌تواند گرمای مورد نیاز ژنراتور را تأمین کند. در این نواحی، رطوبت نسبی بالا نیز باعث کاهش کارایی برج خنک‌کننده می‌شود که به نوبه‌ی خود کارایی سیکل را کاهش می‌دهد. همه‌ی این موارد، نشانگر آن است که کارایی کلی این تکنولوژی به شدت به پارامترهای محیطی وابسته است و در یک منطقه‌ی خاص نیز، با تغییرات آب و هوا، عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد.

۴- مقایسه‌ی اقتصادی چیلرهای جذبی و تراکمی

برای بررسی اقتصادی این سیستم، هزینه‌ی اولیه و هزینه‌های جاری در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ی اولیه شامل هزینه‌ی خرید تجهیزات و هزینه‌ی نصب چیلر است و هزینه‌های جاری هزینه‌ی برق مصرفی و تعمیرات را در برمی‌گیرد. هزینه‌های اولیه‌ی چیلر خورشیدی در جدول (۲) ارائه شده است:

جدول ۷- هزینه‌ی تعمیرات چیلر تراکمی

هزینه جاری	هزینه خرید اولیه	هزینه اولیه	٪ هزینه سرمایه‌گذاری ثابت
تعمیرات	۱۵۲۰\$	۱۱۴۰\$	۶۸,۴\$

همانطور که مشاهده شد هزینه‌ی خرید و نصب، چیلرهای خورشیدی بسیار بیشتر از چیلرهای تراکمی است و عمده‌ی این هزینه‌ها مربوط به خرید کلکتورهای خورشیدی است که هر کدام ۴۲۰\$ است این کلکتورها به دلیل تولید کم، قیمت بالایی دارند. ولی هزینه‌ی مربوط به مصرف برق چیلرهای تراکمی تقریباً ۳ برابر چیلرهای خورشیدی است. عمر مفید چیلرهای تراکمی ۲۰ سال و عمر مفید چیلرهای خورشیدی به علت داشتن قطعات متحرک کمتر، بیشتر از ۲۰ سال است. مبنای محاسبات ۲۰ سال در نظر گرفته شده و هزینه‌های مربوط به این چیلرها تا این سال محاسبه می‌شود. نکته قابل توجه اینکه استفاده از کلکتورهای خورشیدی در فصل زمستان می‌تواند باعث کاهش مصرف گاز جهت گرمایش منزل گردد. بر این اساس، با توجه به میزان تابش در ماههای مختلف سال مقدار گرمایش قابل حصول محاسبه گردید. این مقدار، معادل صرفه جویی ۴۳۶۸/۹۳ متر مکعب مصرف گاز در ۸ ماه دیگر سال است. با احتساب قیمت جهانی گاز طبیعی معادل ۲۰ دلار به ازای هر ۱۰۰۰ فوت مکعب، گاز طبیعی تحویلی درب منزل در سال ۲۰۰۸ بر اساس قیمت گاز در فیش‌های مصرف گاز منازل، این مقدار صرفه جویی معادل ۳۰۵۸ دلار در سال خواهد بود. در حالیکه صرفه جویی گاز با احتساب قیمت‌های فعلی در کشور، معادل ۴۰۰ دلار در سال است. اگر چه بر اساس برنامه‌های توسعه، بارانه سوخت طی چند سال آینده بایستی حذف گردد. بنابراین میزان هزینه‌های سیستم چیلر خورشیدی و تراکمی با توجه به وضعیت فعلی و همچنین قیمت جهانی با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تورم و سود بانکی، مجموع هزینه‌ها تا سال ۲۰۱۲م به شرح زیر است:

هزینه چیلر خورشیدی با احتساب قیمت فعلی گاز

$$= 14290(1.1)^{20} + 178.56 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N + 53.16 \times \sum_{i=1}^{20} 1.1^N$$

$$- 4368.93 \text{m}^3 \times 69/980 \text{\$/m}^3 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N$$

$$= 91354.81901 \text{\$}$$

جدول ۳- هزینه‌ی برق مصرفی چیلرهای خورشیدی

هزینه جاری	(برق مصرفی / هزینه)	تعداد ساعات مصرف	برق مصرفی	هزینه کل
برق	۰/۰۸\$/kWh	۲۲۳۲ hr	۱ kW	۱۷۸/۵۶\$

هزینه‌ی تعمیرات معمولاً ۵/۵ تا ۶ درصد هزینه‌ی در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ثابت ۷۵/۰ درصد هزینه‌ی اولیه است. [۱۰]

جدول ۴- هزینه‌ی تعمیرات چیلر خورشیدی

هزینه جاری	هزینه خرید اولیه	هزینه اولیه	٪ هزینه سرمایه‌گذاری ثابت
تعمیرات	۱۴۱۷۸\$	۱۰۶۳۳\$	۵۳,۱۶\$

کولرهای گازی برخلاف چیلرهای خورشیدی تجهیزات اندک و مصرف برق بالایی دارند و هزینه اولیه آنها فقط شامل خرید یک دستگاه کولرگازی و هزینه‌ی نصب آن است.

جدول ۵- هزینه‌ی اولیه‌ی چیلرهای تراکمی

هزینه اولیه	هزینه
کولرگازی	۱۵۲۰\$
نصب	رایگان

هزینه‌ی جاری این سیستم هزینه‌ی الکتریسیته و هزینه‌ی تعمیرات است که برای یک سال در جدول (۵) و (۶) آورده شده است.

جدول ۶- هزینه‌ی برق مصرفی چیلرهای تراکمی

هزینه جاری	(برق مصرفی / هزینه)	تعداد ساعات مصرف	برق مصرفی	هزینه کل
برق	۰/۰۸\$/kWh	۲۲۳۲ hr	۳ kW	۵۳۵,۶۸\$

به دلیل داشتن قطعات متحرک بیشتر هزینه‌ی تعمیرات چیلرهای تراکمی بیشتر است و معمولاً ۶ درصد F.C.I در نظر گرفته می‌شود.

هزینه چیلر خورشیدی با احتساب قیمت جهانی گاز

$$\begin{aligned} \text{هزینه} &= 14290(1.1)^{20} + 200.88 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N + 53.16 \\ &\times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N - 4368.93 \times 0.66 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^{20} = -69526.2\$ \end{aligned}$$

هزینه چیلر تراکمی

$$\begin{aligned} &= 1520(1.1)^{20} + 535.68 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N \\ &+ 68.4 \times \sum_{i=1}^{20} (1.1)^N = 48284.3497\$ \end{aligned}$$

مشاهده می‌شود که با احتساب قیمت فعلی سوخت در کشور، هزینه‌ی مربوط به چیلرهای خورشیدی، تا سال ۲۰۱۴م که عمر مفید چیلر تراکمی است بیشتر از هزینه‌ی مربوط به چیلرهای تراکمی است ولی در صورتیکه قیمت جهانی گاز مبنای محاسبات قرار گیرد استفاده از سیستم خورشیدی با توجه به رشد فزاینده قیمت‌های سوخت، سود آور نیز خواهد بود. استفاده از این سیستم در کشور ما، بدلیل ارائه سوخت یارانه‌ای در حال حاضر، مقرون به صرفه نیست. در حالیکه در کشورهای اروپا به دلیل قیمت بالای برق و عدم دسترسی به منابع سوخت‌های فسیلی، اقتصادی شده و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشد.

در کشور ما نیز با توجه به آلودگی هوا و نشر قابل توجه دی‌اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای، و همینطور پایان‌پذیری منابع سوخت‌های فسیلی که افزایش قابل توجه قیمت برق را به همراه خواهد داشت، پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ی نه چندان دور، همراه با تولید کلکتور، چیلرهای خورشیدی جایگزین کولرهای آبی و گازی رایج شوند. با محاسبات انجام شده پیش‌بینی می‌شود در شرایط فعلی، در صورتیکه ارائه سوخت در کشور با روند فعلی ادامه یابد، این سیستم در صورتی اقتصادی خواهد بود که قیمت کلکتورهای خورشیدی به \$ ۱۱۰ به ازای هر واحد کاهش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم چیلر خورشیدی انتخاب و شبیه‌سازی شد و تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب عملکرد سیکل مورد بررسی قرار گرفت و سیستم بهینه انتخاب گردید. سپس امکان‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی برای سرمایه‌ش ساختمان‌ها در نقاط مختلف ایران بررسی شده و پتانسیل شهرهای مختلف برای بهره‌مندی از این انرژی ارزان و در دسترس، مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که مشاهده شد بازدهی سیستم‌های خورشیدی به شدت به پارامترهای محیطی وابسته

است و در مکان‌هایی که دمای هوا بالاتر و میزان تابش بیشتر است، بازدهی و میزان سرمایه‌ش تولید شده توسط این سیستم‌ها بیشتر است. این چیلرها با وجود اینکه، برای مکان‌های گرم و خشک مناسب هستند ولی هزینه‌ی اولیه‌ی بالایی دارند و عمده‌ی هزینه‌ی آنها مربوط به کلکتورها است. این چیلرها هنوز در کشورهای در حال توسعه که تکنولوژی ساختن کلکتور را ندارند تجاری نشده‌اند. با وجود این، مزایای آنها از قبیل کاهش مصرف برق، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و نیز کاهش مصرف مبردهای مخرب لایه‌ی اوزون، با وجود بحران انرژی و مشکلات زیست محیطی موجود در قرن حاضر، قابل چشم‌پوشی نیست و این سیستم‌ها بسیار مورد توجه و به سرعت در حال پیشرفت می‌باشند و در آینده‌ی نه چندان دور، هنگامی که کلکتورها به تولید انبوه برسند و قیمت آنها کاهش یابد، قابل رقابت با چیلرهای تراکمی موجود خواهند بود.

مراجع

- [۱] گزارش عملکرد سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در سال (۱۳۸۵).
- [۲] صمیمی جلال، گزارش میزان تابش خورشیدی در شهرهای مختلف ایران، سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)
- [۳] آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک ایران، سازمان هواشناسی کشور
- [4] Z.F. Li, K. Sumathy. "Experimental studies on a solar-powered air conditioning system with partitioned hot water storage tank". Solar energy;71:285-279, (2001).
- [5] Jeffrey M.Gordon, Kim Choon NG, "High efficiency solar cooling, solar Energy", 68:23-31, (1999).
- [6] M. Balghuti, M. H. Chahbani, A. Guizani. "Feasibility of solar absorption air conditioning in Tunisia. Building and environment", 43:1459-1470, (2007).
- [7] A. Syed, M. Izquierdo, P. Rodriguez, G. Maidment, J. Missenden, A. Lecona, R. Tozer. A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid". International journal of refrigeration, 28:859-871, (2005).
- [8] P.L. Ballany, "Refrigeration and Air conditioning", Khanna publisher, Delhi (1992).
- [9] A. Pongtornkupanich S. thepa., Amornkitbamrung, C. Butcher. "Experience with fully operational solar-driven 10 ton LiBr-H₂O single-effect absorption cooling system in Thailand", Renewable Energy, 33:943-949, (2007).
- [10] Max S. Peters, Klauds D. Timmerhaus, Roland E. West, "Plant Design and Economics for Chemical Engineers". McGraw-Hill, Boston (2003).