سال پنجم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۷، صفحات ۶۶ - ۷۳
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

مروری بر سیستم‌های تهویه مطبوع جذبی خورشیدی با بهره گیری از انرژی زمین

فرهاد هادیان فرد [۱*]، امیر امیدوار [۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی ۳۱۳-۷۱۵۵۵، Fh.hadianfard@sutech.ac.ir

چکیده

امروزه دستگاه‌های چیلر جذبی به دلیل برتری‌های مختلفی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. برجسته‌ترین مزیت دستگاه‌های جذبی در مقایسه با سایر سیستم‌های تهویه مطبوع امکان بهره گیری از منابع انرژی کم هزینه‌تر نظیر گاز شهری و یا سوخت گازوئیل به منظور کاهش هزینه‌های جاری سیستم می‌باشد. همچنین می‌توان در چرخه عملکردی این سیستم‌ها به جای استفاده از سوخت‌های فسیلی، انرژی مورد نیاز را از منابع انرژی تجدیدپذیر تامین کرد. انرژی خورشیدی به عنوان یکی از در دسترس‌ترین و مناسب‌ترین منابع انرژی پاک توانایی بالقوه‌ای برای استفاده در چرخه عملکردی سیستم‌های جذبی دارا می‌باشد. از طرفی با توجه به هم فازی اوج نیاز به تهویه مطبوع و ایجاد سرمایش با اوج تابش خورشیدی، بررسی راه کارهای مختلف به منظور بهره‌گیری از این منبع انرژی در سیستم‌های سرمایشی اهمیتی دو چندان پیدا می‌کند. بهره‌گیری از انرژی زمین به عنوان یکی دیگر از منابع انرژی پاک و در دسترس می‌تواند فواید زیادی داشته باشد. بهره‌گیری از انرژی زمین به منظور تامین و یا ذخیره انرژی، بسته به نوع به کار گیری آن، می‌تواند بسیار کارآمد باشد. در این پژوهش در ابتدا به توضیح مختصر سیستم‌های جذبی، چرخه عملکردی و انواع آن پرداخته می‌شود. سپس در ادامه به مرور پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و انرژی زمین در چرخه عملکرد سیستم‌های جذبی پرداخته می‌شود.

کلیدواژگان: چیلر جذبی، تهویه مطبوع، انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، منبع زمین

Review of ground source assisted solar absorption air conditioning systems

Farhad Hadianfard [1*], Amir Omidvar [2]

1- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

* P.O.B 71555-313, Shiraz, Iran, Fh.hadianfard@sutech.ac.ir

Received: Accepted:

Abstract

Nowadays absorption chiller systems, because of their advantages, have been very privileged. In comparison with other HVAC&R systems one the most advantages of these systems is the possibility of consuming low cost energy sources such as natural gas or gasoline to decrease the system running costs. Also, renewable energy sources can be used instead of fossil fuels with these systems. Solar energy, as one of the most accessible and suitable clean energy sources, has a lot of potentiality in using with absorption systems. In addition, since the peak of air conditioning and cooling demands are in the same phase with the peak of solar radiation, investigation of the different potentiality of solar energy utilization in cooling systems is very important. Utilization of ground source, as one of the other clean and accessible energy sources, can be very useful. Using this source as an energy reserve or supply source, depend on its deployment, can be very beneficial. In this research firstly the absorption chiller systems, their working cycle and different kind of these systems are being described in brief. After that some of the research in the area of using renewable energy sources such as solar and ground source energy in absorption systems are being reviewed.

Keywords: Absorption chiller, Air conditioning, Renewable energy, Solar energy, Ground source

۱- مقدمه

از ابتدای شکل گیری زندگی انسان‌ها برای دست یافتن به شرایط محیطی مناسب‌تر از راهکارهای مختلفی بهره برده‌اند. در سالیان اخیر با توجه به رشد روز افزون شهرها، ساختمان‌ها و مجتمع‌های مسکونی، صنعتی و تجاری رویکردهای سنتی تهویه مطبوع کم رنگ‌تر شده‌اند و جایگاه خود را به روش‌ها و سیستم‌های صنعتی داده‌اند. علاوه بر این با توجه به سرعت گرفتن رشد شهرها و مجامع انسانی، نگرانی‌های زیست محیطی و همچنین ارتقا روز افزون سطح کیفی زندگی و در نتیجه نیاز هرچه بیشتر به تهویه مطبوع محیط‌ها، لزوم بازنگری در سیستم‌های تهویه مطبوع و همچنین ارائه راهکارهای جدید در این زمینه می‌تواند از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی باشد [۱].

دستگاه‌های تهویه مطبوع باتوجه به نوع، محیط و شرایط کاربری در ساختارها و ظرفیت‌های متفاوتی در دسترس هستند. در یک دسته بندی کلی می‌توان سیستم‌ها را در سه دسته فقط سرمایشی، فقط گرمایشی و یا گرمایشی/سرمایشی قرار داد. در زمینه تهویه مطبوع ایجاد سرمایش عموما امری پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر محسوب می‌شود [۲]. از همین رو ایجاد سرمایش و روش‌های رسیدن به آن توجهات بیشتری را به خود جلب کرده است و تحقیقات گسترده‌تری پیرامون آن صورت پذیرفته است. سیستم‌های سرمایشی به طور کلی در چند دسته سیستم‌های تبخیری[۱] تراکمی[۲] جذبی[۳] انرژی زمین[۴] ترموالکتریکی و مغناطیسی تقسیم بندی می‌شوند. هریک از این روش‌ها از جنبه‌های مختلفی نظیر ترمودینامیکی، ظرفیت ایجاد سرمایش، هزینه‌های اولیه و کارکرد، میزان نیاز به بازرسی و تعمیرات، نحوه قرارگیری و ارتباط با محیط، میزان تولید آلودگی‌های زیست محیطی و بسیاری از جنبه‌های دیگر قابل بحث و بررسی هستند. از همین رو هریک معایب و مزایای خاص خود را هم دارا می‌باشند.

دستگاه‌های چیلر جذبی از مورد توجه‌ترین سیستم‌های ایجاد سرمایش در سالیان اخیر می‌باشند. از اکثر دستگاه‌های جذبی علاوه بر امکان استفاده در حالت سرمایشی، با اعمال تغییری جزئی در چرخه کاری سیستم می‌توان در حالت گرمایشی هم بهره برد. برجسته‌ترین مزیت سیستم‌های جذبی امکان استفاده از انرژی‌هایی نظیر گاز شهری، سوخت گازوئیل، انرژی‌های نو و یا منابع انرژی کم کیفیت‌تر به جای الکتریسته می‌باشد. با توجه به هم زمانی اوج نیاز به بار سرمایشی با اوج برق مصرفی شبکه و در نتیجه هزینه بالای برق مصرفی این فاکتور تاثیر بسزایی در هزینه‌های مربوط به تهویه مطبوع محیط دارد. حذف استفاده از کلروفلوئوروکربن‌ها[۵] و هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها[۶] کارکرد با صدا و ارتعاش کمتر، کارکرد در فشارهای کاری کمتر، قابلیت اطمینان بیشتر و نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر از دیگر مزیت‌های سیستم‌های جذبی در برابر سیستم‌های تراکمی هستند. از طرفی ضریب عملکرد نسبتا پایین سیستم‌های جذبی یک عامل بازدارنده در حرکت به سوی استفاده از آن‌ها می‌باشد [۱]. با این وجود در صورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و یا گرمای هدر رفته خروجی[۷] از دیگر سیستم‌ها، سیستم‌های جذبی راهکار بسیار مناسبی خواهند بود [۳].

۱ Evaporative
۲ Vapor-Compression
۳ Sorption
۴ Ground source
۵ Chlorofluorocarbons (CFCs)
۶ Hydro chlorofluorocarbons (HCFCs)
۷ Waste heat

تاکنون تعداد زیادی از سیستم‌های جذبی با ساختارها و ظرفیت‌های متعدد در نقاط مختلف نصب شده‌اند و همچنین تحقیقات متعددی به منظور بهبود عملکرد قسمت‌های مختلف این سیستم‌ها صورت گرفته است. ایده اولیه سیستم‌های جذبی مربوط به سال ۱۷۰۰ میلادی می‌باشد. اولین نمونه کاربردی چیلرهای جذبی در سال ۱۸۶۰ میلادی معرفی شد [۴].

همان طور که اشاره گردید امکان بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و یا کم کیفیت‌تر در چرخه‌ی کاری سیستم‌های جذبی به منظور بهبود شرایط آسایش حرارتی، کاهش هزینه‌های جاری و همچنین به حداقل رساندن اثرات مخرب محیطی یکی از عمده‌ترین مزایای سیستم‌های جذبی می‌باشد. از همین رو تاکنون تحقیقات متعددی در این زمینه‌ها انجام شده است [۳]. از طرفی دیگر افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در جهان و محدودیت در برداشت این سوخت‌ها، دغدغه‌های گرمایش جهانی و بروز تغییرات جهانی آب و هوا خود تاکیدی بر لزوم بازنگری در مصرف سوخت‌های فسیلی می‌باشد. در ادامه به معرفی چندین منبع انرژی تجدیدپذیر که توانایی بهره گیری در سیستم‌های جذبی را دارند می‌پردازیم.

۱-۱- انرژی خورشیدی

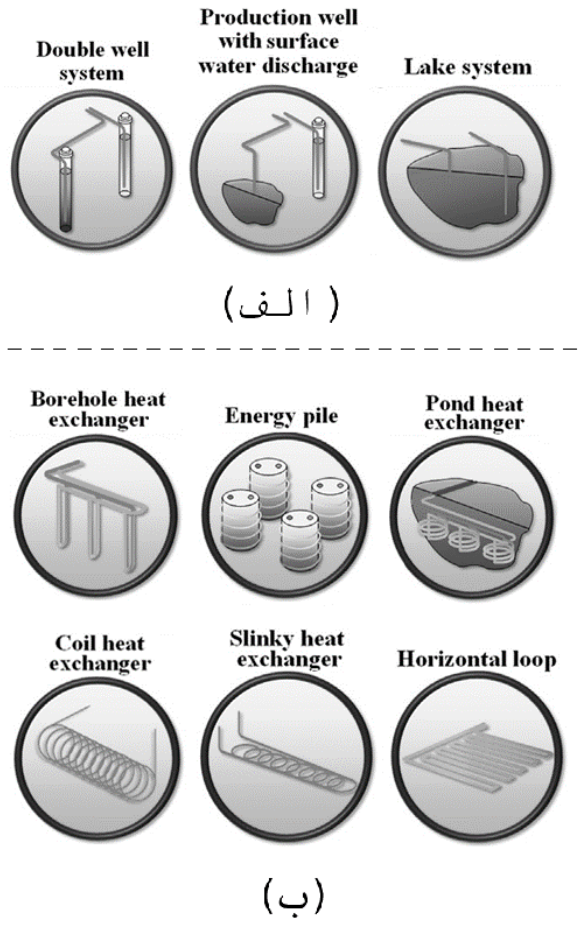
با توجه به میزان بالای انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین و همچنین قابلیت برداشت و دسترسی در اقصی نقاط جهان، این منبع انرژی همواره به عنوان مطرح‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر مورد بحث بوده است. از طرفی دیگر با توجه به هم فازی حداکثر میزان تابش خورشید (به عنوان مهمترین عامل تاثیرگذار بر شرایط محیطی نظیر میزان دما و رطوبت محیط) با حداکثر نیاز به تهویه مطبوع محیط‌ها، لزوم بررسی نقاط ضعف و قوت تابش خورشیدی بر میزان بار سرمایشی و یا گرمایشی فضاها و همچنین نحوه عملکرد سیستم‌های سرمایشی دو چندان می‌شود [۳]. از طرفی دیگر با توجه به واقع شدن کشور ایران بر روی کمربند خورشیدی کره زمین، این انرژی می‌تواند یکی از مناسب‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در داخل کشور باشد. بر اساس آمارهای سازمان انرژی‌های نو ایران، ایران کشوری با حدودا ۳۰۰ روز آفتابی در سال و متوسط تابش خورشیدی در حدود ۴/۵ – ۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز می‌باشد [۵]. این آمار خود تاکیدی مجدد بر ظرفیت بالای این منبع انرژی در کشور می‌باشد.

۲-۱- انرژی زمین

انرژی زمین از دیگر منابع انرژی در دسترس می‌باشد، که به شرط رعایت اصول، طراحی مناسب و همچنین در نظر داشتن شرایط محیط و منطقه (به منظور عدم تاثیر گذاری بلند مدت بر شرایط محیط) می‌تواند از منابع تجدیدپذیر محسوب شود [۶]. همان گونه که اشاره شد از دیگر روش‌های ایجاد سرمایش و یا گرمایش بهره گیری از انرژی زمین می‌باشد. با توجه به حجم زیاد زمین و همچنین آب‌های زیرزمینی و در نتیجه ظرفیت گرمایی بالای این مواد، زمین قابلیت بالایی در ذخیره و تامین انرژی حرارتی دارا می‌باشد. با پایین رفتن در عمق زمین، دمای خاک در عمقی مشخص (بسته به شرایط منطقه) ثابت مانده و بیش از آن تحت تاثیر شرایط فصلی نمی‌باشد. از همین رو از این منبع انرژی می‌توان برای ایجاد سرمایش در تابستان و یا گرمایش در زمستان بهره برد [۷]. بهره گیری از انرژی زمین دارای سابقه‌ای طولانی در زندگی انسان‌ها هست. سکونت در غارها، ساخت خانه های زمین پناه، ساخت سردآبه‌ها همگی نمونه‌هایی قدیمی از شیوه‌های مطلوب بهره

گیری از این روش می‌باشند ولی با تغییرات سبک و محیط زندگی بهره گیری از این روش هم دست خوش تغییراتی شده است. استفاده از این روش همراه با مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. تاکنون تحقیقات و مطالعات متعددی بر روی انواع منابع زمینی، طراحی بهینه و همچنین ترکیب آن با دیگر روش‌ها صورت پذیرفته است و این روند همچنان ادامه دارد. استفاده از مبدل‌های افقی زمین به هوا، چاه‌های مبدل حرارتی عمودی و یا مبدل‌های چرخه باز زمینی همگی نمونه‌هایی از روش‌های جدید بهره گیری از انرژی زمین می‌باشند.

تجدیدپذیر بودن، توانایی ذخیره برای استفاده‌های بعدی، همیشه در دسترس بودن، امکان بهره گیری برای تولید گرمایش و همچنین قابلیت اطمینان بالا از عمده ترین مزایایی این روش می‌باشد. از طرفی دیگر هزینه اولیه نسبتا بالا، لزوم طراحی بهینه به منظور اشباع نشدن زمین اطراف و همچنین عدم توانایی در رسیدن به دماهای خنک کاری پایین (کمتر از در حدود ۱۸ درجه سانتی گراد) می توانند از جمله موانع بازدارنده این روش باشند. انرژی زمین بسته به شرایط بهره گیری به دو دسته کلی چرخه باز و چرخه بسته تقسیم می‌شود. در نوع چرخه باز سیال کاری (معمولا آب و یا هوا) از یک منبع گرفته شده و پس از تبادل حرارتی به منبعی دیگر تزریق می‌شود. در نوع چرخه بسته، همانند یک مبدل حرارتی سیال کاری وارد یک حلقه شده و پس از تبادل حرارتی با محیط مجددا به چرخه برگردانده



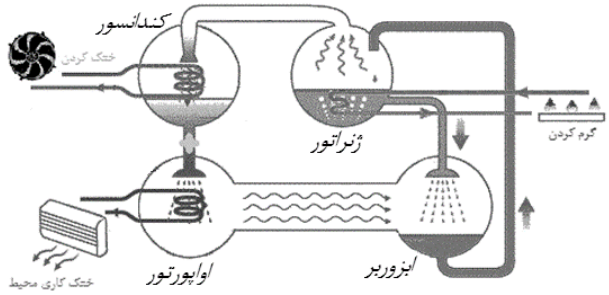
شکل ۲. شیوه‌های مختلف بهره برداری از انرژی زمین الف) انواع چرخه باز ب) انواع چرخه بسته [۸]

می‌شود. شکل ۱-الف و ۱-ب [۸] به ترتیب شیوه‌های مختلف بهره برداری چرخه باز و چرخه بسته از این انرژی را نشان می‌دهد. این منبع انرژی بسته به نحوه بهره برداری در قسمت‌های مختلف یک سیستم جذبی جهت خنک‌کاری، گرمایش/پیش گرمایش و یا حتی مخزن ذخیره گرم و سرد قابل استفاده می‌باشد. این منبع انرژی در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و زمینه‌های پژوهشی مختلفی را به خود جلب کرده است. فریدلیفسسون و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۸ میلادی به بررسی میزان گسترش انرژی زمین به منظور استفاده مستقیم و یا استفاده برای تولید برق در کشورهای مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها همچنان هزینه‌های مربوط به بهره گیری از انرژی زمین را بررسی کرده‌اند.

دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی باد، زیست توده هر یک می‌توانند بسته به نحوه و شرایط به کار گیری در چرخه سیستم‌های جذبی جایگاه خاص خود را داشته باشند که در این مبحث به آن‌ها پرداخته نشده است.

۲- چرخه عملکرد سیستم‌های جذبی با جاذب مایع

به منظور بررسی سیستم‌های جذبی لازم است در ابتدا مروری بر چرخه عملکردی این سیستم‌ها و المان‌های مختلف سیستم داشته باشیم. شکل ۲ شماتیکی کلی از چرخه عملکرد سیستم‌های جذبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک کلی چرخه عملکرد چیلرهای جذبی

در توضیح چرخه سیستم از محفظه اواپورتور شروع می‌کنیم. در حالت سرمایشی، سیال ثانویه در حال گردش در سیستم تهویه ساختمان (معمولا آب) پس از آن که گرمای محیط را می‌گیرد وارد مبدل حرارتی در اواپورتور می‌شود. سیال ثانویه با عبور از مبدل حرارتی، گرمای خود را به سیال کاری موجود در اواپورتور داده و پس از خنک شدن مجددا به سمت ساختمان باز می‌گردد. سیال کاری موجود در اواپورتور به سمت ابزوربر کشیده شده و در ماده جاذب موجود در محفظه ابزوربر حل می‌شود. ماده جاذب موجود در ابزوربر تمایل بالایی در جذب سیال کاری دارد، به همین دلیل محفظه‌ی جاذب همانند مکش عمل کرده و باعث افت فشار و در نتیجه کاهش دمای سیال کاری موجود در اواپورتور می‌شود. اساس نام گذاری سیستم‌های جذبی همین مرحله از عملکرد آن‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به گرماده بودن این فرآیند می‌بایست محفظه ابزوربر توسط مکانیسمی جداگانه خنک شود. پس از این محلول رقیق حاصل از انحلال سیال کاری در ماده جاذب به سمت محفظه ژنراتور پمپ می‌شود. در این قسمت به منظور جداسازی سیال کاری و ماده جاذب، به محلول گرما داده می‌شود. با توجه به

پایین‌تر بودن دمای تبخیر سیال کاری، این ماده زودتر تبخیر شده و به سمت محفظه کندانسور حرکت می‌کند. ماده جاذب غلیظ شده مجددا از طریق مسیری جداگانه به سمت محفظه ابزوربر حرکت می‌کند. در ادامه چرخه همان طور که اشاره شد سیال کاری بخار شده به سمت محفظه کندانسور حرکت می‌کند. سیال کاری در این قسمت با عبور از مبدل حرارتی، گرمای خود را به سیال ثانویه منتقل می‌کند و مایع می‌شود. لازم به ذکر است که این سیال ثانویه خود باید توسط مکانیسمی جداگانه خنک شود. سیال کاری پس از عبور از محفظه کندانسور وارد شیر فشار شکن شده و در طی یک فرآیند آنتالپی ثابت با کاهش فشار دمای آن مجددا کاهش پیدا می‌کند. سیال کاری خنک شده مجددا وارد محفظه اواپورتور می‌شود. این چرخه مادامی که سیستم در حال عملکرد است در جریان می‌باشد.

از سیستم‌های جذبی در حالت گرمایشی هم می‌توان بهره برد [۳]. در برخی از سیستم‌هایی که از این قابلیت برخوردار هستند، با انتخاب حالت گرمایشی، محفظه کندانسور و شیر فشار شکن از چرخه خارج شده و بخار گرم تولیدی در ژنراتور مستقیما به محفظه اواپورتور رفته و حرارت خود را به سیال در حال گردش در سیستم تهویه ساختمان منتقل می‌کند. در ادامه چرخه (همانند حالت سرمایشی) بخار سرد شده به سمت محفظه ابزوربر کشیده می‌شود و چرخه ادامه پیدا می‌کند. همچنین باید توجه داشت که چرخه ثانویه خنک کننده محفظه کندانسور در حالت گرمایشی کارکردی نداشته و کاملا غیر فعال می‌باشد.

با توجه به جامع‌تر بودن عملکرد حالت سرمایشی در ادامه توجه مطلب بیشتر به سمت عملکرد سرمایشی می‌باشد.

۳- ضریب عملکرد

به منظور بررسی کارآمدی سیستم‌های سرمایشی از شاخص بدون بعد ضریب عملکرد[۸] استفاده می‌کنند. این شاخص به صورت نسبت مقدار گرمای گرفته شده از محیط به مقدار انرژی داده شده به سیستم محاسبه می‌شود. در سیستم‌های جذبی این شاخص به صورت نسبت گرمای گرفته شده در محفظه اواپورتور به انرژی گرمایی ورودی به سیستم در محفظه ژنراتور تعریف می‌شود. همان طور که قبلا هم اشاره شد سیستم‌های جذبی در مقایسه با دیگر سیستم‌های سرمایشی (به طور مثال یک سیستم تراکمی) با ظرفیت و شرایط یکسان از ضریب عملکرد پایین‌تری برخوردار هستند. به بیانی دیگر یک سیستم جذبی برای تولید میزان سرمایشی معادل با یک سیستم تراکمی، انرژی ورودی بیشتری نیاز خواهد داشت. از همین رو از نظر هزینه‌های جاری عملکرد، یک سیستم جذبی تنها هنگامی قابلیت رقابت با یک سیستم تراکمی با ظرفیت مشابه را دارد که حداقل قسمتی از انرژی ورودی به سیستم از منابع انرژی کم هزینه‌تر تامین شود [۱۰].

۴- دسته بندی سیستم‌های جذبی با جاذب مایع

سیستم‌های جذبی از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی و دسته بندی هستند. در ادامه به چندین دسته بندی مهم از سیستم‌های جذبی مایع/گاز که در قسمت‌های بعد با آن‌ها سروکار داریم، می‌پردازیم.

۴-۱- ترکیب کاری چرخه

تا کنون ترکیب‌های مختلفی برای عملکرد در چرخه چیلرهای جذبی ارائه شده است. آب-آمونیاک[۹] به عنوان اولین ترکیب ارائه شده برای استفاده در سیستم‌های جذبی شناخته می‌شود. در این ترکیب جزء آمونیاک به عنوان سیال کاری در ناحیه کم فشار سیستم و جزء آب به عنوان ماده جاذب و در ناحیه پرفشار سیستم جریان دارد. با توجه به پایین بودن دمای انجماد آمونیاک، با بهره گیری از این ترکیب کاری می‌توان در اواپورتور حتی به دماهای خنک کاری زیر صفر هم دست یافت. این مورد به عنوان مهمترین مزیت این ترکیب کاری بیان می‌شود. در عین حال به دلیل سمی و زیست تخریب‌پذیر بودن جز آمونیاک، امروزه ترکیب‌های کاری دیگری پیشنهاد شده‌اند [۱]. ترکیب لیتیوم بروماید-آب[۱۰] دیگر ترکیب پرکاربرد در سیستم‌های جذبی می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی معرفی شد [۴]. در این ترکیب برخلاف حالت قبل جزء آب به عنوان سیال کاری و در ناحیه کم فشار سیستم جریان دارد و جزء لیتیوم بروماید به عنوان ماده جاذب و در ناحیه پرفشار سیستم می‌باشد. این ترکیب خواص مضر ترکیب آب-آمونیاک را نداشته ولی در رسیدن به دماهای خنک کاری پایین (به دلیل احتمال انجماد آب در محفظه اواپورتور) دارای محدودیت هست. از همین رو امروزه اکثر سیستم‌های جذبی، به خصوص در کاربرد تهویه مطبوع، از ترکیب لیتیوم بروماید-آب استفاده می‌کنند [۱].

ترکیب‌های کاری مختلف دیگری نظیر لیتیوم کلراید-آب[۱۱]، آمونیاک-سدیم تئوسیانایت[۱۲] و آمونیاک-کلسیم کلراید[۱۳] به منظور استفاده در سیستم‌های جذبی معرفی شده‌اند که هرکدام مزایا و معایب خود را دارند ولی تا به حال هیچ یک به طور گسترده تجاری سازی نشده‌اند [۱].

۴-۲- سیستم‌های تک و یا چند اثره

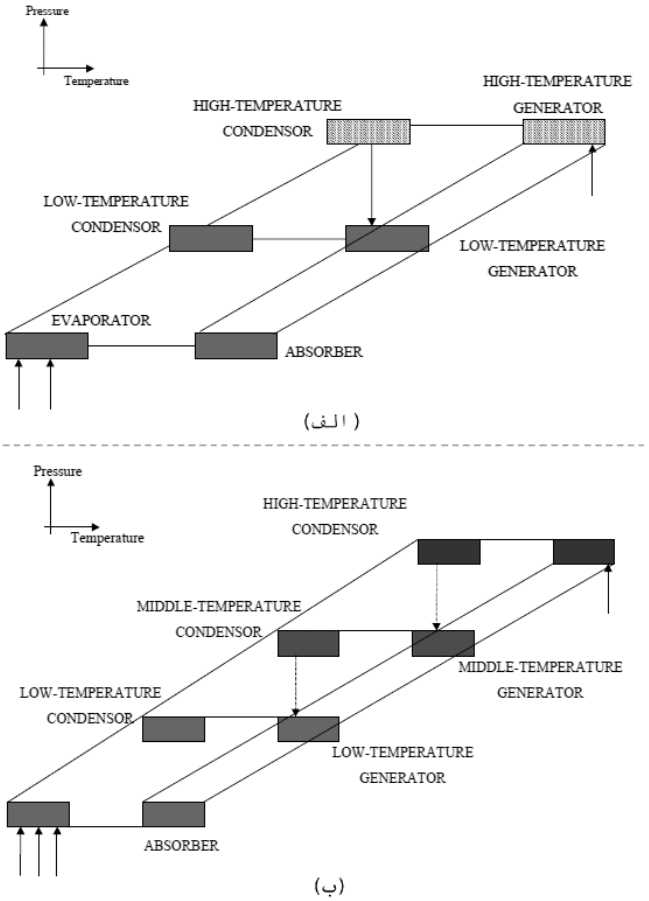
چرخه‌های شرح داده شده در قسمت‌های قبل تحت عنوان چرخه‌های تک اثره شناخته می‌شوند. همان گونه که عنوان شد سیستم‌های تک اثره دارای یک محفظه کندانسور و یک محفظه ژنراتور می‌باشند. در سیستم‌های دو اثره محفظه کندانسور و ژنراتور هر یک به دو محفظه دما بالا و دما پایین تقسیم شده‌اند [۲, ۳]. ایده اولیه پیدایش سیستم‌های دو اثره به منظور بهره گیری مفید از انرژی‌های گرمایی کم کیفیت‌تر و یا انرژی گرمایی تخلیه شده از دیگر سیستم‌ها بود. در این روش انرژی گرمایی با کیفیت‌تر در محفظه ژنراتور دما بالا استفاده می‌شود. انرژی گرمایی تخلیه شده از کندانسور دما بالا و یا سایر انرژی‌های گرمایی کم کیفیت‌تر در دسترس به منظور گرمایش محفظه ژنراتور دما پایین استفاده می‌شود. علاوه بر سیستم‌های دو اثره، سیستم‌های سه اثره هم معرفی و تا حدودی تجاری سازی شده‌اند. شکل ۳-الف و ۳-ب [۲] به ترتیب شماتیک عملکرد سیستم‌های دو اثره و سه اثره را نشان می‌دهد.

به طور معمول سیستم‌های تک اثره ضریب عملکردی در حدود ۰/۶ تا ۰/۸ دارند، در حالی که در انوع دو اثره ضریب عملکرد در بازه حدود ۱ تا ۱/۲ و در نوع سه اثره در حدود ۱/۵ تا ۱/۷ می‌باشد [۲]. باتوجه به دمای بالاتر مورد نیاز (بالای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در انواع دو و سه اثره، انرژی

۸ Coefficient Of Performance (COP)

۹ H_2O-NH_3
۱۰ $LiBr$-H_2O
۱۱ $LiCl$-H_2O
۱۲ NH_3-$NaSCN$
۱۳ NH_3-$CaCl_2$

گرمایی بیشتری برای عملکرد این سیستم‌ها مورد نیاز هست. از همین رو در سیستم‌های جذبی خورشیدی آبگرمکن‌های خورشیدی صفحه تخت[۱۴] و لوله ای تخلیه شده[۱۵] در سیستم‌های دو و سه اثره برای استفاده در محفظه ژنراتور دما بالا پاسخگو نبوده و می‌بایست از آبگرمکن‌های خورشیدی متمرکز شونده[۱۶] استفاده کرد [۳]. امروزه سیستم‌های چند اثره به دلیل دارا بودن ضرائب عملکردی بالاتر مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند ولی هزینه اولیه بالاتر هنوز هم یک عامل بازدارنده در زمینه استفاده از سیستم‌های چند اثره می‌باشد [۱۱].

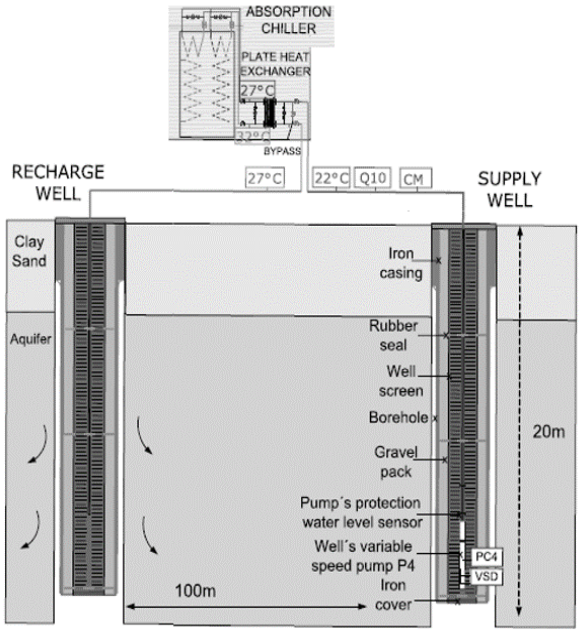


شکل ۳. شماتیک عملکرد سیستم‌های چند اثره الف) سیستم دو اثره ب) سیستم سه اثره [۲]

۵- مروری بر تحقیقات انجام شده

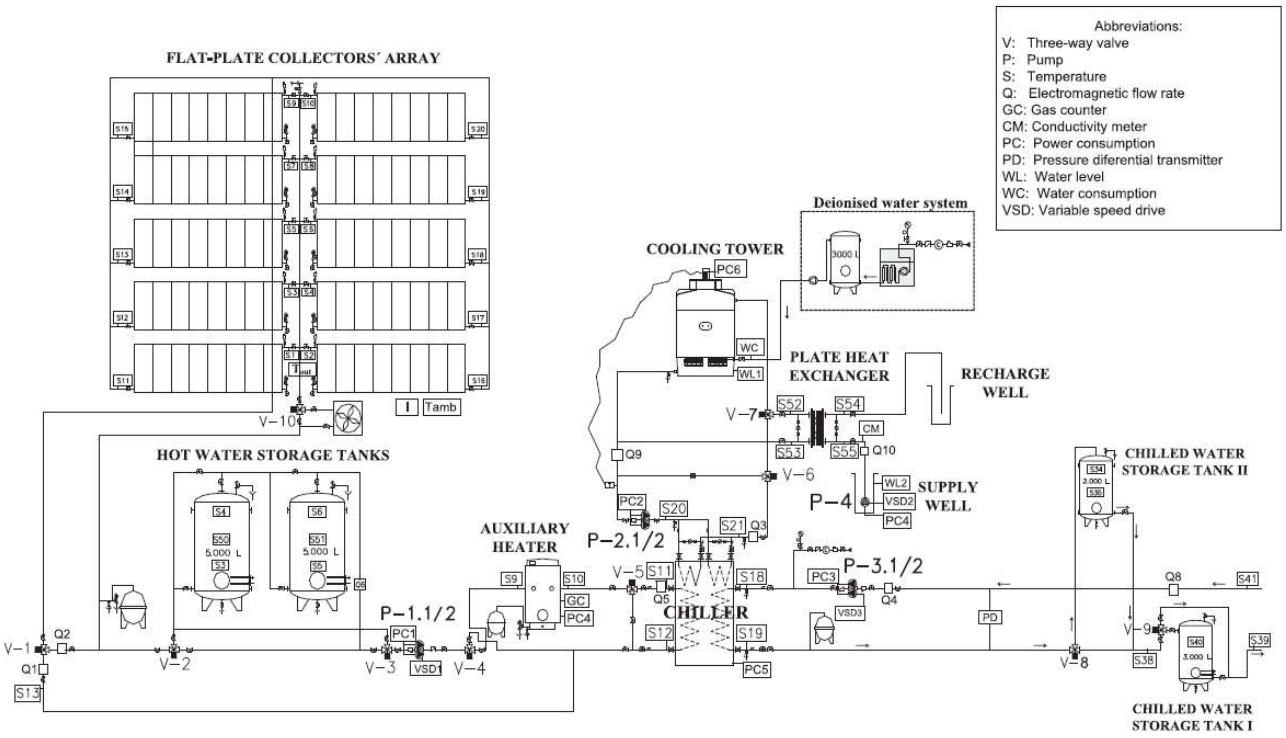
تاکنون تحقیقات متعددی پیرامون بهره گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در چرخه سیستم‌های جذبی به منظور کاهش اثرات زیست محیطی و همچنین کاهش هزینه‌های جاری سیستم‌های جذبی در عین حفظ عملکرد مطلوب سیستم، صورت گرفته است. بهره گیری از انرژی خورشیدی در سیستم‌های جذبی از مواردی هست که تا کنون تحقیقات زیادی پیرامون آن صورت پذیرفته و نمونه‌های مختلفی از این سیستم‌ها هم تجاری شده و به مرحله بهره برداری رسیده‌اند. در این سیستم‌ها از آبگرمکن‌های خورشیدی به منظور گرم کردن (و یا پیش گرم کردن) محلول موجود در محفظه ژنراتور بهره گرفته می‌شود.

رویسک و بتلس [۱۲] در سال ۲۰۰۹ میلادی به بررسی تجربی یک سیستم چیلر جذبی خورشیدی جهت تهویه مطبوع ساختمان مرکزی تحقیقات انرژی خورشیدی در اسپانیا پرداخته‌اند. این سیستم از مجموعه آبگرمکن خورشیدی، دستگاه چیلر جذبی، برج خنک کن، مخزن ذخیره آب گرم و همچنین گرم کن کمکی تشکیل شده است و توانایی تامین تمام بار سرمایشی و یا گرمایشی ساختمان را دارد. همان گونه که رویسک و بتلس عنوان کرده‌اند بزرگ‌ترین مزیت ساختمان حاضر، به دلیل کاربری اداری ساختمان، هم زمانی نیاز به ایجاد سرمایش با ساعات تابش خورشید می‌باشد. طبق اندازه گیری‌های انجام شده کل بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان فوق به ترتیب برابر با ۱۳۲۵۵ و ۸۱۲۴ کیلووات ساعت در سال می‌باشد. ساختمان مذکور در منطقه جنوبی اسپانیا با میزان تابش کل سالیانه ۱۸۰۵ کیلووات ساعت، تابش مستقیم ۱۹۷۷ کیلووات ساعت و تابش پخشی ۵۲۷ کیلووات ساعت واقع شده است. آبگرمکن خورشیدی استفاده شده در این سیستم از نوع صفحه تخت، تک جداره و روکش شده با مواد جذب انتخابی با مساحت کل ۱۶۰ متر مربع و مساحت سطح جذب ۲/۰۲ متر مربع می‌باشد که منبع اصلی تولید انرژی برای سرمایش و گرمایش هستند. دستگاه چیلر به کار برده شده از نوع تغذیه با آب گرم، تک اثره و ماده کاری آب-لیتیوم بروماید با ظرفیت نامی تولید ۷۰ کیلووات سرمایش می‌باشد. این سیستم شامل دو مخزن ذخیره آب گرم با ظرفیت هریک ۵۰۰۰ لیتر (مجموع ۱۰۰۰۰ لیتر) می‌باشد. این مخازن به منظور متعادل سازی میزان تولید و مصرف انرژی خورشیدی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین یک گرم کن برقی کمکی به



شکل ۴. نمای کلی چاه‌های زمینی چرخه باز جهت خنک کردن کندانسور در پژوهش رویسک و بتلس [۱۴]

۱۴ Flat Plate Solar Collectors
۱۵ Evacuated Tube Solar Collectors
۱۶ Concentrated Solar Collectors



شکل ۵. نمای کلی سیستم جذبی خورشیدی به همراه چاه‌های زمینی در پژوهش رویسک و بتلس [۱۴]

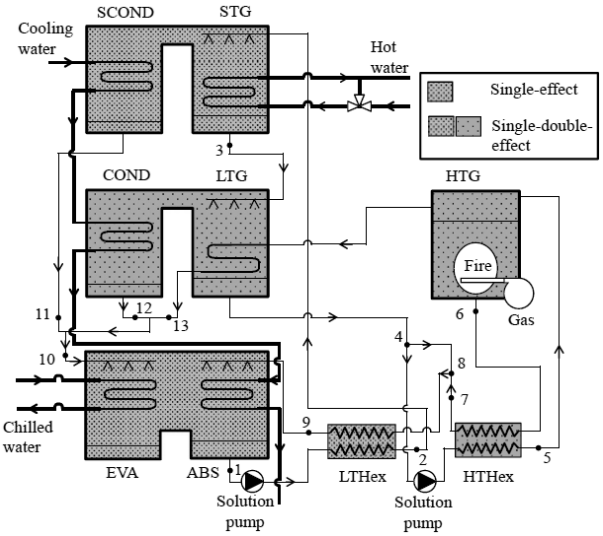
ظرفیت ۱۰۰ کیلووات به منظور جبران کمبود انرژی خورشیدی قابل دسترس در مواقع ضروری به صورت سری مابین دستگاه چیلر و مخزن ذخیره آب گرم در نظر گرفته شده است. برج خنک کن استفاده شده در این سیستم دارای ظرفیت ۱۷۰ کیلووات می‌باشد. همچنین یک کنترل کننده هوشمند وظیفه تنظیم قسمت‌های مختلف را به منظور عملکرد بهینه سیستم در حالت‌های کارکردی مختلف بر عهده دارد. در این پژوهش میزان تابش دریافتی، دما و جریان سیال در قسمت‌های مختلف سیستم و همچنین میزان بار سرمایشی/گرمایشی دریافتی در ساختمان اندازه گیری شده است و از این طریق میزان پاسخ گویی و بازده سیستم برای شرایط مختلف عملکردی محاسبه شده است. بر همین اساس نتایج اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد که ساعات کارکردی گرم‌کن برقی کمکی ناچیز بوده و انرژی خورشیدی بیشتر انرژی مورد نیاز سیستم را تامین کرده است. رویسک و بتلس اشاره کرده‌اند که بهره گیری از مخازن ذخیره آب گرم نقش بسزایی در افزایش استفاده از منبع تجدیدپذیر دارد. برای یک دوره تابستان میانگین بار سرمایشی ساختمان ۴۰ کیلووات و ضریب عملکرد یخچالی سیستم برابر با ۰/۶ بوده است. همچنین بهره گیری از آبگرمکن خورشیدی باعث صرفه جویی ۱۷ مگاوات ساعت انرژی و کاهش تولید ۱۳ تن گاز دی‌اکسید کربن شده است.

در تحقیق دیگری رویسک و بتلس [۱۳] در سال ۲۰۱۲ میلادی به بررسی تجربی تاثیرات اضافه کردن مخزن ذخیره آب خنک شده به سیستم چیلر جذبی خورشیدی فوق پرداخته‌اند. اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد که به دلیل پراکندگی زیاد میزان تقاضا برای تهویه مطبوع ساختمان در طول ساعت‌ها و روزهای مختلف، سیستم جذبی در بعضی مواقع توانایی برآوردن حداکثر نیاز سرمایشی ساختمان را ندارد و از طرفی دیگر بعضی مواقع که بار سرمایشی چندانی در ساختمان مورد نیاز نیست سیستم وارد عملکرد با ظرفیت نیمه شده و از نقطه عملکرد بهینه خارج می‌شود. از همین رو کاربرد مخزن ذخیره آب خنک شده تاثیر بسزایی در متعادل سازی عملکرد سیستم دارد. در این تحقیق دو مخزن ذخیره آب خنک شده به حجم ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ لیتر به سیستم اضافه شده است. با توجه به اندازه گیری‌های انجام شده افزودن این مخازن به سیستم به ترتیب باعث کاهش ۲۰ و ۳۰ درصد در مصرف برق و آب و همچنین کاهش تولید ۱/۷ تن گاز کربن دی‌اکسید می‌شود.

رویسک و بتلس [۱۴] در سال ۲۰۱۲ میلادی به بررسی تجربی ترکیب چیلر جذبی خورشیدی ماخذ [۱۳] با چاه زمین گرمایی پرداخته‌اند. در این پژوهش چرخه زمین گرمایی از نوع چرخه باز بوده که به عنوان جایگزینی برای برج خنک در سیستم‌های متداول و به منظور خنک کردن محفظه کندانسور در چرخه چیلر جذبی معرفی شده است. در این پژوهش دو چاه عمودی به عمق هر یک ۲۰ متر و فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر جایگزین برج خنک کن در سیستم ماخذ [۱۳] شده است و مابقی اجزا بدون تغییر مانده‌اند. آب مورد نیاز جهت خنک کردن کندانسور از چاه اول گرفته می‌شود و پس از عبور از مبدل حرارتی و خنک کردن کندانسور به چاه دوم تزریق می‌شود. شکل ۴ [۱۴] و شکل ۵ [۱۴] به ترتیب نمایی از عملکرد چاه‌های زمینی و اجزای کلی سیستم را نشان می‌دهند. رویسک و بتلس اشاره کرده‌اند که حذف برج خنک علاوه بر حذف مصرف آب و سیستم سختی گیر آب باعث کاهش فضای اشغال شده توسط سیستم و همچنین حذف صداهای اضافی خارجی می‌شود. بر اساس نتایج گزارش شده از رویسک و بتلس اعمال تغییرات فوق باعث صرفه جویی ۳۱ درصد در مصرف

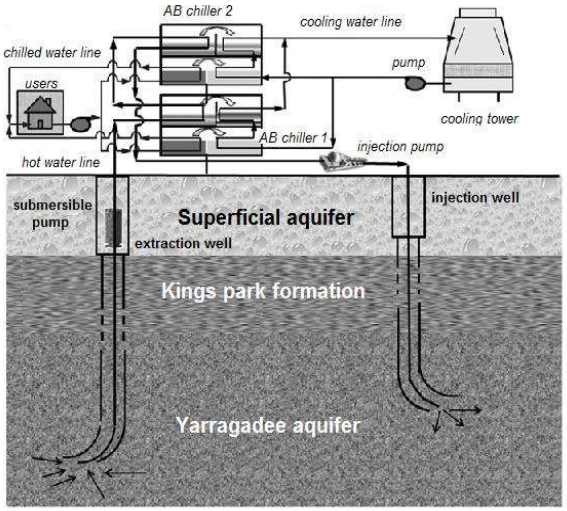
برق، ۱۱۶ مترمکعب در مصرف آب و همچنین کاهش تولید ۸۳۳ کیلوگرم گازهای گلخانه‌ای در طول یک دوره گرمایشی می‌شود.

لوبیس و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ میلادی به بررسی تجربی و تحلیلی یک سیستم جذبی تک-دو اثره خورشیدی پرداخته‌اند. در این پژوهش به منظور تامین تمام بار سرمایشی ساختمان و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سیستم یک سیستم خلاقانه جدید ارائه شده است. نحوه عملکرد این سیستم بدین صورت است که در مواقعی که انرژی خورشیدی مورد نیاز برای عملکرد سیستم جذبی به منظور تامین بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان در دسترس باشد، سیستم به صورت تک اثره و تنها با بهره گیری از انرژی خورشیدی عمل می‌کند. در شرایطی که انرژی خورشیدی در دسترس کافی نباشد و یا تمام ظرفیت سرمایشی سیستم مورد نیاز باشد، سیستم وارد عملکرد دو اثره می‌شود. در حالت عملکرد دو اثره، مشعل گازی وظیفه جبران کمبود انرژی مورد نیاز دستگاه را بر عهده دارد. چیلر جذبی مورد مطالعه دارای ظرفیت اسمی ۲۳۹ کیلووات بوده و در کشور اندونزی با شرایط آب و هوایی استوایی نصب شده است. همچنین در این تحقیق از ۶۲ آبگرمکن خورشیدی لوله‌ای تخلیه شده به مساحت کل ۱۸۱/۰۴ متر مربع، یک مخزن ذخیره آب گرم به حجم ۱۰۰۰ لیتر و یک برج خنک کن برای خنک کردن محفظ ابزوربر و کندانسور استفاده شده است. شکل ۶ [۱۵] شماتیک کلی سیستم فوق را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ضریب عملکرد سیستم فوق نسبت به یک سیستم دو اثره مشابه و در دماهای بالا و پایین یکسان بیشتر بوده است. کمینه و بیشینه ضریب عملکرد دستگاه به ترتیب برابر با ۱/۴ تا ۳/۳ می‌باشد. همچنین بهره گیری از انرژی خورشیدی به دلیل شرایط استوایی منطقه و دسترسی به تابش مناسب خورشید در تمام فصول سال عملکرد مناسبی داشته و نسبت به حالت تامین تمام انرژی سیستم توسط گاز، باعث کاهش مصرف گاز بین ۷ تا ۵۸ درصد می‌شود.

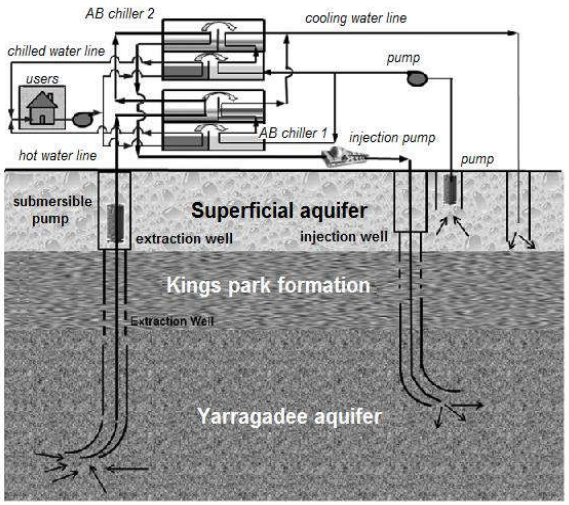


شکل ۶. شماتیک کلی سیستم جذبی تک-دو اثره در پژوهش لوبیس و همکاران [۱۵]

کریمی‌نیا و فرهادی [۱۶] در سال ۱۳۹۳ شمسی به بررسی فنی و اقتصادی یک سیستم چیلر جذبی خورشیدی پرداخته‌اند. این سیستم با ظرفیت نامی ۱۹ کیلووات و با چرخه عملکردی تک اثره و با بهره گیری از ترکیب کاری آب-لیتیوم برماید می‌باشد و تحت شرایط آب و هوایی شهر اصفهان مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق اثرات دو نوع آبگرمکن خورشیدی صفحه تخت و لوله‌ای تخلیه شده برای مساحت‌های مختلف با هم مقایسه شده است. سیستم مذکور شامل برج خنک کن آبی، مخزن ذخیره آب گرم و یک گرم‌کن کمکی برقی می‌باشد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهره گیری از آبگرمکن خورشیدی لوله‌ای تخلیه شده با مساحت کل ۳۰ متر مربع با دوره بازگشت سرمایه ۱۶/۳ سال بهینه‌ترین حالت از منظر اقتصادی می‌باشد. همچنین سیستم فوق باعث صرفه جویی ۸۹۵ متر مکعب گاز و ۳۷/۴۷ مگاژول انرژی در سال می‌شود.



(الف)



(ب)

۷. شماتیک کلی سیستم چیلر جذبی در پژوهش وانگ و همکاران الف) بهره گیری از برج خنک کن ب) بهره گیری از چاه زمینی کم عمق [۱۷]

وانگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۳ میلادی به امکان سنجی و بررسی اقتصادی استفاده از چاه‌های زمینی عمیق و کم عمق در چرخه چیلرهای جذبی پرداخته‌اند. در این پژوهش دو چیلر جذبی به صورت موازی با ظرفیت کلی ایجاد ۲ مگاوات سرمایش، وظیفه تامین بار پایه

سرمایشی ساختمان مرکزی دانشگاه غربی استرالیا[17] برعهده دارند. در این تحقیق نحوه عملکرد به این صورت است که آب گرم از یک چاه زمینی به عمق ۳ کیلومتر با دمایی در حدود ۹۰ تا ۹۵ درجه سانتی‌گراد وارد مبدل حرارتی محفظه ژنراتور چیلر اول می‌شود و پس از تبادل حرارتی با دمایی در حدود ۸۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد وارد مبدل حرارتی محفظه ژنراتور چیلر دوم می‌شود. به منظور بهم نزدن توازن آب‌های زیرزمینی این آب سپس به یک چاه زمینی به عمق ۲ کیلومتر و در فاصله ۸۰۰ متری از چاه برداشت، تزریق می‌شود. علاوه بر این امکان بهره گیری از دو شیوه‌ی استفاده از برج خنک کن و یا چاه زمینی کم عمق چرخه باز به منظور خنک کردن محفظه کندانسور در این تحقیق بررسی شده است. شکل ۷-الف و ۷-ب [۱۷] شماتیک کلی سیستم را به ترتیب در حالت استفاده از برج خنک کن و چاه زمینی کم عمق نشان می‌دهد. در حالت استفاده از برج خنک کن سالیانه در حدود ۲۱۶۵ مگاوات ساعت برق و تولید ۲۰۳۵ تن گاز دی‌اکسید کربن صرفه جویی می‌شود. در حالت بهره گیری از چاه زمینی کم عمق مصرف برق سیستم افزایش می‌یابد و در نتیجه مقادیر صرفه جویی شده به ۱۵۶۸ مگاوات ساعت برق و تولید ۱۴۷۴ تن گاز دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد ولی در عوض آن مصرف آب سیستم به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. از منظر اقتصادی ارزش کلی فعلی[18] سیستم در حالت استفاده از برج خنک کن برابر با ۱/۲ میلیون دلار و دوره بازگشت سرمایه برابر با ۱۲/۵ سال می‌باشد. استفاده از چاه‌های زمینی کم عمق با وجود افزایش هزینه کلی فعلی سیستم به ۱/۹ میلیون دلار، دوره بازگشت سرمایه، به دلیل افزایش سود سالیانه سیستم، به ۱۱/۳ سال کاهش می‌یابد.

۶- جمع بندی

تاکنون تحقیقات بسیاری پیرامون بهره گیری از انرژی خورشیدی در چیلرهای جذبی صورت پذیرفته و راهکارهای بهینه و خلاقانه مختلفی ارائه شده است. کارآمدی و پاسخگویی سیستم‌های خورشیدی با بهره گیری از چیدمان‌های خلاقانه اثبات شده‌اند. همچنین نمونه‌های مختلفی از چیلرهای جذبی خورشیدی در کشورهای مختلف نصب و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

همچنین تاکنون تحقیقات متعددی پیرامون بهره گیری از انرژی زمین در قسمت‌های مختلف سیستم‌های خورشیدی صورت پذیرفته و راهکارهای مختلفی ارائه شده است. ولی کارآمدی، پاسخگویی و عملکرد بهینه سیستم‌های خورشیدی-زمینی نیازمند بررسی‌های بیشتری هست. در چند سال اخیر تعدادی سیستم‌های خورشیدی-زمینی در کشورهای مختلفی نصب و بهره برداری شده‌اند ولی تاکنون در داخل کشور نمونه‌ای از این سیستم‌ها گزارش نشده است.

۷- مراجع

[1] E. Bellos, C. Tzivanidis, and K.A. Antonopoulos, Exergetic and energetic comparison of LiCl-H2O and LiBr-H2O working pairs in a solar absorption cooling system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 123, pp. 453-461, 2016.

[2] T. Tang, L. Villareal and J. Green, Absorption chillers: Southern California gas company new building institute advanced design guideline series. *New Building Institute*, ۱۹۹۸.

[3] X. Zhai, et al., A review for research and new design options of solar absorption cooling systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 15, N. 9, pp. 4416-4423, ۲۰۱۱.

[4] P. Srikhirin, S. Aphornratana, and S. Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 5, N. 4, pp. 343-372, ۲۰۰۱.

[5] http//:www.suna.org.ir/fa/sun. (Visited on 25 Feb. 2018)

[6] S. Hähnlein, et al., Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, Vol. 59, pp. ۹۱۴-۹۲۵, ۲۰۱۳.

[۷] س. گلرودباری، همکاران، تعیین قطر بهینه مبدل حرارتی هوا–زمین به روش تحلیلی جهت کاربرد تهویه مطبوع. *مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۵، شماره ۱۲، صفحات ۴۸۱-۴۹۰، ۱۳۹۴.

[8] V. Somogyi, V. Sebestyén, and G. Nagy, Scientific achievements and regulation of shallow geothermal systems in six European countries–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 934-952, 2017.

[9] I.B. Fridleifsson, et al. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. I*PCC scoping meeting on renewable energy sources*, proceedings, Luebeck, Germany, pp. 59-80, 20-25 January 2008.

[10] U. Eicker, and D. Pietruschka, Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 41, N. 1, pp. 81-91, 2009.

[11] R. Gomri, Investigation of the potential of application of single effect and multiple effect absorption cooling systems. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, N. 8, pp. 1629-۱۶۳۶, ۲۰۱۰.

[12] S. Rosiek, and F. Batlles, Integration of the solar thermal energy in the construction: Analysis of the solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building. *Renewable Energy*, Vol. 34, N. 6, pp. 1423-1431, 2009.

[13] S. Rosiek, and F.J.B. Garrido, Performance evaluation of solar-assisted air-conditioning system with chilled water storage (CIESOL building). *Energy Conversion and Management*, Vol. 55, pp. 81-92, 2012.

[14] S. Rosiek, and F. Batlles, Shallow geothermal energy applied to a solar-assisted air-conditioning system in southern Spain: two-year experience. *Applied energy*, Vol. 100, pp. 267-276, ۲۰۱۲.

[15] A. Lubis, et al., Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates. *Renewable Energy*, Vol. 99, pp. 825-835, 2016.

[۱۶] ح. کریمی‌نیا، ف. فرهادی، شبیه سازی و بررسی فنی - اقتصادی سامانه چیلرجذبی تک اثره آب-لیتیم بروماید مدد یافته با انرژی خورشیدی، *نشریه شیمی و مهندس شیمی ایران*، ۱۳۹۳.

[17] X. Wang, et al., Application of geothermal absorption air-conditioning system: a case study. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, N. 1, pp. 71-80, 2013.

۱۷ University of Western Australia (UWA)
۱۸ Net Present Value (NPV)