نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۳، شماره ۶، شماره پیاپی ۱۵۹، بهمن و اسفند ۱۴۰۳، صفحه ۲۴-۱۶
ISSN: 1605-9719

DOI: https://doi.org/10.30506/mmep.2024.2041717.2212

تأمین بار حرارتی و برودتی ساختمان ها به کمک انواع سامانه های ترکیبی با مبدل زمین به هوا

علی علیخانی
کارشناسی ارشد

مهدی معرفت*
استاد،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس،
تهران

عسگر مینایی
دانشیار،
مهندسی مکانیک،
دانشگاه محقق اردبیلی،
اردبیل

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

چکیده: به دلیل افزایش و رشد ناگهانی جمعیت، تقاضای انرژی جهانی بالا رفته است. بنابراین تمایل به استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر نیز افزایش یافته است. یکی از راه های کاهش مصرف انرژی، استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق بوده که در فصول گرم با عبور هوای محیط از لوله های مدفون در عمقی از خاک می توان هوای ورودی به ساختمان را سرد یا پیش سرد و در فصول سرد نیز می توان آن را گرم یا پیش گرم کرد. با توجه به اینکه این سامانه در بسیاری از موارد جوابگوی بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان نیست به همین دلیل می توان این سامانه را به صورت ترکیبی با دیگر سیستم های حرارتی استفاده کرد. در این مقاله آخرین تحقیقات و پیشرفت های انجام شده بر روی سامانه های ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا با هواساز، پمپ زمین گرمایی هوایی، بازیاب حرارتی، سیستم سرمایش تبخیری، بادگیر، سقف گنبدی، سیستم سرمایش دسیکنت، سیستم های فتوولتائیک/ فتوولتائیک حرارتی، هواکش خورشیدی و مواد تغییر فازدهنده بررسی شده است. بررسی نتایج این تحقیقات نشان می دهد که به کار بردن مبدل حرارتی زمین به هوا با سایر سیستم های فعال و غیرفعال می تواند کارایی حرارتی کلی سامانه ترکیبی را نسبت به استفاده از مبدل حرارتی در حالت تکی به صورت محسوسی افزایش دهد.

واژه‌های راهنما: مبدل حرارتی زمین به هوا، سامانه های ترکیبی، پیش گرم / پیش سرد کردن هوا، مصرف انرژی، انرژی زمین گرمایی

Providing heating and cooling loads using of various hybrid systems with Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE)

Ali Alikhani
M.Sc.

Mehdi Maerefat*
Professor,
Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

Asgar Minaei
Associate Professor,
Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil

Abstract: Due to growth of the population, the global energy demand has increased drastically. Therefore, the desire to use renewable energy sources has also increased. One of the ways to reduce energy consumption is to use shallow geothermal energy. In the hot seasons of the year, the inlet air of the building can be cooled/pre-cooled by passing the warm ambient air through the tubes, tunnels or channels buried deep in the soil, where the soil temperature is lower than the ambient air, and in the cold seasons, it can be heated/preheated. This system in many cases does not respond to the cooling and heating load of the building, therefore, this system can be used in combination with other thermal systems. The latest researches and developments on the hybrid systems of earth-to-air heat exchanger (EAHE) with air handling unit, air geothermal heat pump, heat recovery, evaporative cooling system, wind tower, dome roof, desiccant cooling system, solar chimney photovoltaic/thermal photovoltaic systems, solar air heating and phase change materials have been investigated. Studying the results shows that using these hybrid systems can significantly increase the overall thermal efficiency of the system compared to using the EAHE in a single mode.

Keywords: Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE), Hybrid systems, Preheating/Precooling of air, Energy consumption, Geothermal energy

*نویسنده مسئول، maerefat@modares.ac.ir

۱- مقدمه

کمبود منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی و تغییرات اقلیم آب و هوایی به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای موضوعات اصلی نگران‌کننده جهان امروز می‌باشد [۱]. ساختمان‌ها در مجموع به ترتیب حدود ۳۶ درصد از کل مصرف انرژی جهان و ۳۹ درصد از تولید گاز کربن دی اکسید را تشکیل می دهند [۲]. بنابراین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند مصرف سوخت‌های فسیلی و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. انرژی زمین گرمایی گونه‌ای از انرژی تجدیدپذیر و فراوانی است که محدود به فصل و زمان و مکان خاصی نیست و می‌تواند برای پیش سرمایش/سرمایش و پیش گرمایش/گرمایش هوای ورودی به ساختمان‌ها استفاده شود [۳].

یکی از راه‌های بهره‌مندی از انرژی زمین گرمایی کم عمق[1] استفاده از سامانه مبدل‌های حرارتی زمین به هوا[2] است. این نوع سامانه‌ها از لوله‌ها، تونل‌ها و کانال‌هایی تشکیل شده‌اند که در عمق حدود ۵-۱ متری از سطح زمین دفن می‌شوند. به دلیل اینرسی و ظرفیت حرارتی بالای خاک، دمای آن نسبت به دمای هوای محیط بیرون دارای تأخیر زمانی بوده و در زیر سطح زمین نسبت به هوای محیط در تابستان خنک‌تر و در زمستان گرم‌تر است [۴]. این نوع سامانه‌ها با به‌کارگیری فن (دمنده) و یا به‌طور طبیعی، جریان هوا در داخل لوله مدفون را به گردش درآورده و به دلیل اختلاف دمای موجود بین خاک اطراف لوله و جریان هوا، باعث تبادل حرارتی و درنهایت ایجاد هوای مطبوع برای محیط کاربر می‌گردد. به طوریکه دمای هوای خروجی از مبدل در فصول گرم، خنک‌تر و در فصول سرد، گرم‌تر از هوای محیط می‌شود [۵]. به دلیل اینکه این نوع سامانه ممکن است به تنهایی نتواند بار سرمایشی/گرمایشی ساختمان را تأمین کند، بهتر است با دیگر سیستم‌های حرارتی ترکیب شود.

در این مقاله سعی شده است که مهم‌ترین و جدیدترین سامانه‌های ترکیبی با مبدل حرارتی زمین به هوا معرفی شود.

۲- سامانه‌های ترکیبی با مبدل حرارتی زمین به هوا

یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده مبدل حرارتی زمین به هوا قابلیت ترکیب با انواع سیستم‌های فعال و غیرفعال[3] می‌باشد. استفاده از این نوع مبدل‌های حرارتی کارایی و عملکرد حرارتی کلی سامانه ترکیبی را افزایش می‌دهد، همچنین می‌تواند مصرف انرژی مورد نیاز برای تهویه مطبوع ساختمان‌ها را نیز کاهش دهد [۶]. محققین در سال‌های اخیر بسیاری از این نوع سیستم‌ها را با یکدیگر ترکیب نمودند با این حال مطالعات بیشتری برای شناخت پارامترهای طراحی بهینه، عملکرد و کارایی حرارتی این نوع سامانه‌های ترکیبی مورد نیاز است.

۲-۱- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – هواساز[4]

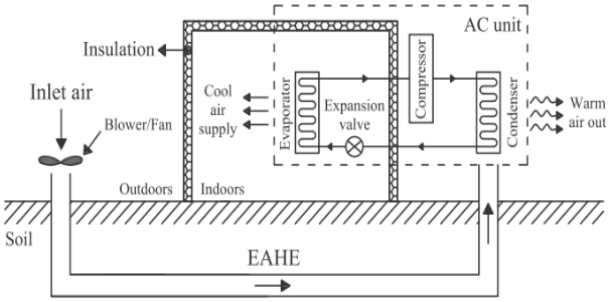
مبدل حرارتی زمین به هوا می‌تواند با هواسازها ترکیب گردد و علاوه بر پیش سرد/پیش گرم کردن هوای ورودی به هواسازها به بهبود رطوبت‌زدایی در اقلیم‌های گرم و مرطوب کمک کند؛ زیرا با استفاده از این سامانه ترکیبی در مقایسه با روش‌های مرسوم افزایش رطوبت‌زدایی[5] که شامل افزایش ظرفیت سرمایشی سپس افزودن بازگرمایش است، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که این سامانه ترکیبی برای گرمایش ۶۰-۷۰ درصد و برای سرمایش ۴۰-۵۵ درصد توان حرارتی کویل‌های هواساز را کاهش می‌دهد [۷].

۲-۲- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – پمپ زمین گرمایی هوایی[6]

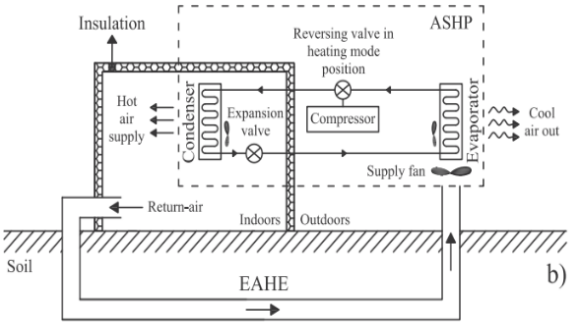
پمپ زمین گرمایی هوایی را می‌توان با جابه‌جایی کندانسور و اواپراتور[7] با توجه به نیاز حرارتی سرمایشی و گرمایشی استفاده نمود. از جمله کاربرد پمپ‌های زمین گرمایی هوایی می‌توان به سرد و گرم کردن هوای محیط داخل مانند کولر گازی اشاره نمود [۸]. تا سال ۲۰۵۰ تعداد کولر گازی رشدی حدود ۲۵۰ درصدی خواهند داشت که منجر به افزایش ۳۰۰ تا ۴۰۰ درصدی تقاضای مصرف انرژی می‌گردد [۵]. با توجه به شکل (۱)، در اثر تبادل حرارتی بین هوای خنک شده خروجی از لوله مبدل حرارتی زمین به هوا و بخش‌های کندانسور و کمپرسور کولر گازی دمای قسمت کندانسور کاهش و نسبت فشار در کمپرسور نیز به دلیل خنک شدن هوای اطراف آن، افزایش می‌یابد و در نهایت ظرفیت سرمایشی کلی سامانه ترکیبی افزایش می‌یابد. مطالعات انجام شده پیرامون این سامانه ترکیبی نشان می‌دهد که به کارگیری مبدل حرارتی می‌تواند ۱۸ درصد از توان الکتریکی مصرفی کمپرسور را کاهش دهد [۹]. مطالعات محققین نشان می‌دهد

[1] Shallow Geothermal System (SGS)
[2] Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE)
[3] Passive and Active systems
[4] Air Handling Unit (AHU)
[5] Dehumidification
[6] Air Source Heat Pump (ASHP)
[7] Evaporator

که به کارگیری این نوع سیستم ترکیبی می‌تواند به ترتیب ۹/۶ و ۱۳/۸ درصد از مصرف انرژی سرمایشی سالیانه محیط کاربر را برای شهرهای هوستون و دالاس آمریکا کاهش دهد [۱۰].
همچنین می توان از پمپ حرارتی هوا به آب با انتقال حرارت از هوا به سیال آب به ترتیب آب گرم مصرفی (دمای ۳۵ و ۵۵ درجه سلسیوس برای سیستم‌های گرمایش از کف و فن کویل) و آب سرد مصرفی (دمای ۶ درجه سلسیوس برای چیلر) را در فصول زمستان و تابستان تأمین کرد [۸]. با توجه به شکل‌های شماتیک (۲) این سامانه ترکیبی را می‌توان در فصول زمستان برای گرم نمودن هوای داخل ساختمان نیز استفاده نمود.



شکل ۱ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – کولر گازی در فصل تابستان [۵]

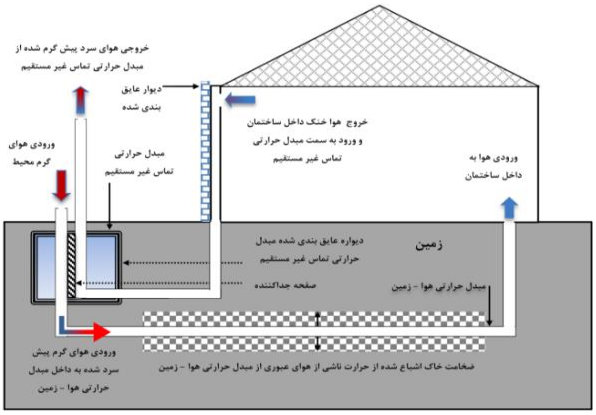


شکل ۲ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - پمپ زمین گرمایی هوایی در فصل زمستان [۵]

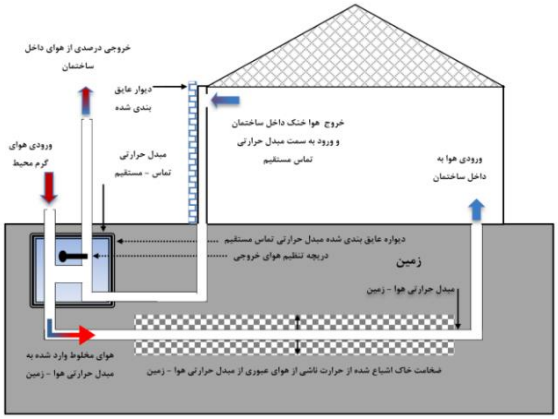
۲-۳- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – بازیاب حرارتی[1]

بازیاب‌های حرارتی یکی از نوین‌ترین سیستم‌های تهویه مطبوعی است که برای بخشی از انرژی از دست رفته در اثر تهویه هوای داخل محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. به طور کلی بازیاب‌ها نوعی از مبدل های حرارتی هستند که از فن و کانال-های مکش و دمش (تخلیه) تشکیل شده‌اند.

در این نوع سامانه‌های ترکیبی لوله‌های زمینی در قسمت بالادست به بازیاب حرارتی متصل می‌گردد و با پیش گرم و پیش سرد کردن هوا در نهایت هوای مطبوع وارد محیط کاربر می‌گردد. بازیاب‌های حرارتی به دو دسته بازیاب‌های تماس مستقیم و غیرمستقیم[2] تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۲]. در بازیاب‌های تماس غیرمستقیم با توجه به شکل شماتیک (۳) هیچ تماس مستقیمی بین سیال سرد و گرم اتفاق نمی‌افتد و به جای خروج و هدررفت هوای خنک داخل ساختمان از در و پنجره‌های داخلی، جریان هوا به سمت مبدل حرارتی هدایت می‌گردد. در حالی که در حالت تماس مستقیم سیال سرد و گرم با یکدیگر تماس پیدا کرده و هوای محیط کاربر با درصد مشخصی از هوای تازه مخلوط و سپس هوای ترکیب شده که دمای آن چندین درجه کاهش یافته به داخل لوله‌های مبدل زمین به هوا هدایت و در نهایت مجدد وارد محیط کاربر می‌گردد که شماتیک آن در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۳ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بازیاب حرارتی غیرمستقیم در فصل تابستان [۱۳]



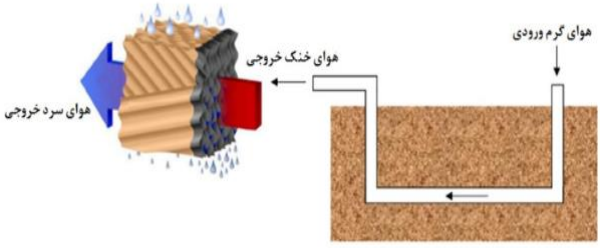
شکل ۴ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - بازیاب حرارتی مستقیم در فصل تابستان [۱۳]

[1] Heat Recovery Unit (HRU)
[2] Direct/Indirect Heat Recovery Unit

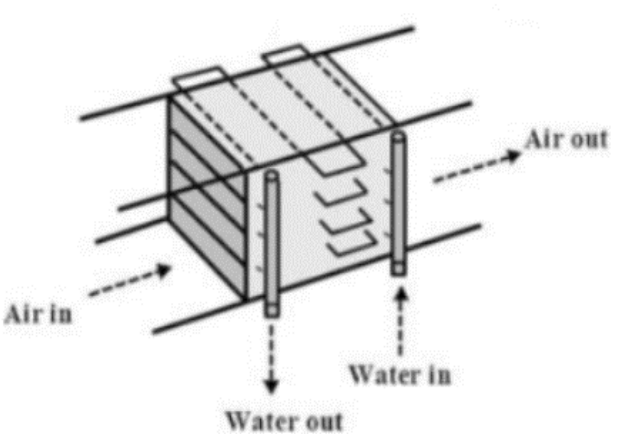
در برخی موارد دربازیاب حرارتی از یک دریچه استفاده می‌شود که می‌تواند جهت مسیر جریان هوای خروجی تنظیم شود که به آن دریچه کنارگذر[1] گفته می‌شود [۱۴] و هوای خروجی از محیط می‌تواند با تنظیم این شیر به انتهای مبدل و یا به هوای محیط بیرون تخلیه گردد.

۲-۴- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – سیستم های سرمایش تبخیری[2]

اساس سیستم‌های خنک کننده تبخیری بدین صورت است که قطرات آب با دریافت گرما و حرارت به بخار تبدیل شده و با کاهش دمای هوا آن را خنک می‌سازد. این نوع سیستم‌ها به طور کلی به دو دسته تبخیری مستقیم و غیر مستقیم[3] تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۵]. عملکرد سامانه ترکیبی مبدل زمین به هوا و سرمایش تبخیر مستقیم که در شکل (۵) شماتیکی از آن ترسیم شده، بر این اساس است که هوای گرم محیط در ابتدای لوله به داخل مبدل حرارتی زمین به هوا وارد می‌شود و در اثر تبادل حرارتی بین خاک اطراف لوله و هوای گرم قسمتی از حرارت خود را به خاک می‌دهد و از این طریق پیش سرد می‌شود. سپس این هوای پیش سرد شده با ورود به خنک کننده تبخیری مستقیم که در شکل (۶) مشخص است، با استفاده از مفاهیم انتقال جرم و حرارت و تماس غیرمستقیم با لوله‌های آب علاوه بر افزایش رطوبت، دچار کاهش دما می‌شود. تحقیقات انجام شده بر روی این نوع سامانه ترکیبی نشان می‌دهد که راندمان آن در مقایسه با سامانه سرمایش تبخیری مستقیم به صورت تنها مانند کولر آبی حدود ۴۵ درصد بیشتر است [۱۶]. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این نوع سیستم ترکیبی نسبت به لوله‌های مبدل زمین به هوای خشک می‌تواند تا ۹۳/۵ درصد از طول مبدل زمین به هوا بکاهد [۱۷].



شکل ۵ شماتیک ترکیب مبدل زمین به هوا- سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۶]



شکل ۶ شماتیک نمونه‌ای از سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۱۸]

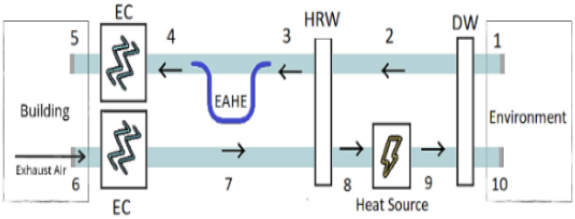
در سامانه ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا - تبخیری غیرمستقیم از مبدل حرارتی تشکیل شده که دو گذرگاه عمود بر هم داشته و هوا در یکی از گذرگاه‌ها به صورت جداگانه عبور می کند؛ به‌طوری که هوای پیش سرد شده خروجی از لوله مبدل زمین به هوا به صورت غیرمستقیم در تماس با گذرگاهی که با اسپری کردن آب در بالای لوله مبدل قرار دارد خنک شده و یا هوا با لوله‌های سرد آب تماس پیدا کرده و دمای آن را کاهش می‌دهد. یکی از مزیت‌های این سیستم نسبت به خنک‌کننده‌های مستقیم کاهش حدود ۴۵ درصد مصرف آب می‌باشد همچنین این نوع سیستم می‌تواند حدود ۶۲ درصد از مصرف انرژی سالیانه محیط کاربر را کاهش دهد [۱۹].

۲-۵- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – سیستم سرمایش دسیکنت[4]

یکی از سیستم‌های جدید و نوین، ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا با سیستم سرمایش دسیکنت برای تأمین بار سرمایشی در مناطق گرم و مرطوب می‌باشد. در این نوع خنک‌کننده‌ها، هوا رطوبت‌گیری شده و سپس در حد قابل قبول به وسیله سیستم‌های تبخیری سرد می‌گردد. مواد خشک کن رطوبت هوا را تا جایی که با هوا به تعادل رطوبتی برسند، از آن جذب می‌کنند. رطوبت جذب شده توسط ماده خشک کن را می‌توان با گرم کردن و قرار دادن آن در معرض جریان هوای احیا کننده[5] از ماده خشک‌کن حذف کرد تا بتواند دوباره رطوبت را جذب کرد [۲۰]. همان‌طور که شکل شماتیک (۷) مشخص است، در ابتدا هوای محیط وارد چرخ دسیکنت می‌شود که در آن رطوبت مخصوص

[1] Direct/Indirect Evaporation Cooling (DEC/IDEC)
[2] Desiccant Cooling System (DCS)
[3] Bypass valve
[4] Evaporation Cooling systems (ECS)
[5] Regeneration Air Stream

هوا کاهش می‌یابد. سپس هوا از چرخ احیای حرارتی عبور می‌کند و دمای آن با نسبت رطوبت ثابت کاهش می‌یابد. پس از آن هوا وارد مبدل حرارتی زمین به هوا شده و پیش سرد گردیده و وارد کولر آبی (نوعی از سیستم سرمایش تبخیری مستقیم) شده و در نهایت به محیط کاربر می‌رسد. هوای برگشتی در کولر دوم خنک شده و وارد چرخ احیای حرارتی شده و دمای آن طی یک فرایند نسبت رطوبت ثابت افزایش می‌گردد. سپس وارد گرمکن شده و دمای آن تا دمای احیای چرخ دسیکنت افزایش و وارد چرخ دسیکنت شده و مواد جاذب را تقویت می‌کند، در نهایت نیز این هوا به محیط بیرون هدایت می‌شود [۲۱]. مطالعه مینایی و همکاران نشان می‌دهد این نوع سامانه ترکیبی می‌تواند دمای هوای ورود به اتاق را ۵/۳ درجه سلسیوس نسبت به کولر آبی به تنهایی کاهش دهد.



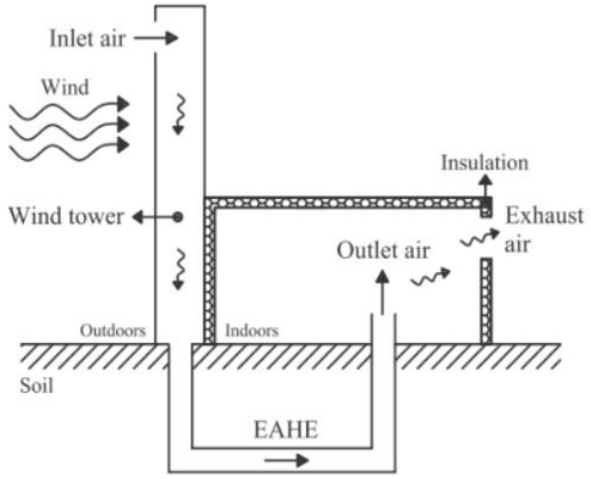
شکل ۷ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – سیستم سرمایش دسیکنت [۲۱]

۲-۶- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – بادگیر[1]

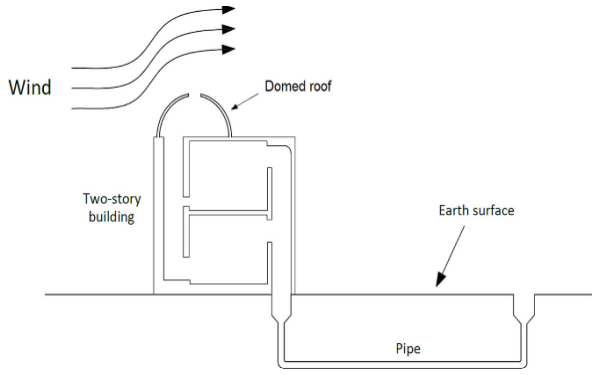
با توجه به شکل شماتیک (۸) در این نوع سیستم ترکیبی، مبدل حرارتی زمین به هوا به بادگیر متصل می‌گردد. از جمله مزیت‌های این سیستم این است که هوای داخل ساختمان به‌طور طبیعی[2] و غیرفعال خنک و تهویه می‌شود همچنین هزینه نگه داری آن کم و نصب آن نیز ساده می‌باشد. بر این اساس که با اثر شناوری و ایجاد فشار مثبت در ورودی بادگیر و خروجی اتاق‌ها هوا به داخل ساختمان مکیده می‌شود. در طی روز هوای گرم و خشک ورودی به بادگیر با دیواره‌های خنک که در شب قبل خنک شده‌اند تماس پیدا کرده و پیش سرد شده و وارد مبدل حرارتی زمین به هوا می‌شوند و در نهایت وارد محیط کاربر می‌گردد. از آنجایی که هوای سرد و خنک سنگین و چگال‌تر می‌باشد به طرف پایین حرکت کرده و پس از گرم شدن به بالا حرکت می‌کند. این هوای گرم محیط را می‌توان با استفاده از دریچه‌های تخلیه هوا ، هواکش خورشیدی و ... خارج نمود. برای افزایش راندمان این نوع سامانه‌های ترکیبی می‌توان آن را با سیستم‌های سرمایش تبخیری نیز ترکیب نمود [۵]. در ارائه نتایج تحقیقات انجام شده بر روی این سامانه‌های ترکیبی (ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – بادگیر- سرمایش تبخیری) تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد دمای هوای محیط بیرون را کاهش و ۲۳ درصد به رطوبت نسبی آن اضافه شده است [۲۲].

۲-۷- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – سقف گنبدی[3]

می‌توان این نوع مبدل‌ها را با سقف گنبدی که معمولاً در سقف بازارها و مساجد قدیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد ترکیب نمود. بدین صورت که با عبور هوا از روی سطح منحنی (نیم‌کره) سرعت هوا در بالاترین نقطه منحنی به حداکثر مقدار می‌رسد ودر مقابل فشار آن کاهش می‌یابد. در اثر این اختلاف فشار هوای بالا و پایین، هوا از دریچه بالا سقف گنبدی خارج می‌گردد که در شکل شماتیک (۹) قابل مشاهده است [۲۳].



شکل ۸ شماتیک ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – بادگیر [۵]

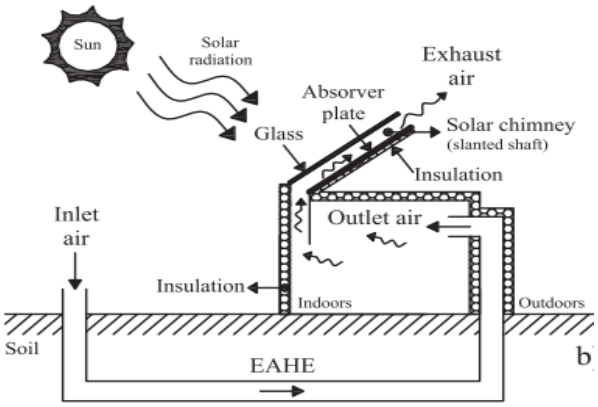


شکل ۹ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – سقف گنبدی [۲۳]

[1] Wind tower/Wind catcher
[3] Dome roof
[4] Solar chimney

۲-۸- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - هواکش خورشیدی[1]

در این روش که شماتیکی از آن در شکل (۱۰) رسم شده است. با ترکیب مبدل زمین به هوا با هواکش خورشیدی برای تأمین آسایش حرارتی، تهویه طبیعی ایجاد شده و سرمایش حاصل می‌گردد. در این سامانه انرژی ناشی از حرارت خورشیدی سبب گرم شدن هوای داخل هواکش و متعاقباً کاهش چگالی آن می‌شود. سپس با توجه به اثر نیروی شناوری ناشی از تفاوت چگالی میان هوای داخل و خارج هواکش، هوای داخل اتاق به درون هواکش کشیده شده و در نتیجه عبور هوا به داخل لوله مبدل حرارتی زمین به هوا می‌گردد. برای ایجاد مکش طبیعی در هواکش خورشیدی از یک دیواره با شیشه مشرف به جنوب و دیوارهای فلزی و تیره رنگ به عنوان سطح جاذب حرارت برای جذب تشعشع خورشید می‌شود. همچنین پشت سطح جاذب حرارت نیز عایق می‌گردد [۵].

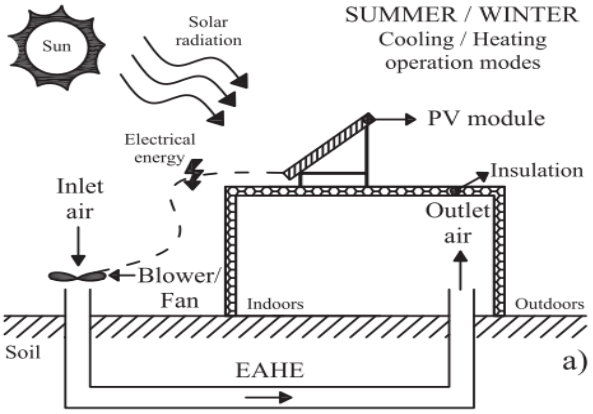


شکل ۱۰ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - هواکش خورشیدی [۵]

۲-۹- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - فتوولتائیک / فتوولتائیک حرارتی

در حال حاضر برای معماران و طراحان یکی از جدیدترین و بهترین روش‌های تولید و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک / فتوولتائیک حرارتی است که به طور یکپارچه در پوشش ساختمان نصب می‌شوند و یا با بخشی از اجزای ساختمان مانند نماها، سقف‌ها یا پنجره‌ها ادغام می‌شوند. یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای ترکیب این نوع سیستم‌ها با مبدل حرارتی زمین به هوا، استفاده از سلول‌های فتوولتائیک برای تولید برق ناشی از توان مصرفی فن (دمنده) برای به حرکت در آمدن هوا در داخل لوله‌های مبدل زمین به هوا و در نهایت گرم / سرد کردن هوای ورودی است که شماتیکی از آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همچنین ترکیب این نوع سامانه‌ها می‌تواند برای تهویه مطبوع انواع ساختمان‌ها نیز استفاده گردد [۵].

مهم‌ترین ایرادات سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه ساختمان، افزایش دمای کارکردی سلول‌های فتوولتائیک بوده که منجر به کاهش بازده الکتریکی تولید برق می‌گردد. یکی از راه‌های افزایش این بازده پیش سرد نمودن هوای ورودی به وسیله مبدل‌های حرارتی زمین به هوا و خنک نمودن سلول‌های فتوولتائیک است. نتایج نشان می‌دهد که دمای این سلول‌ها می‌تواند بین ۸ تا ۱۳ درجه سلسیوس خنک شده و بازده الکتریکی آن تا ۲۳ درصد افزایش می‌یابد [۲۴].



شکل ۱۱ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا –فتوولتائیک/فتوولتائیک حرارتی[۵]

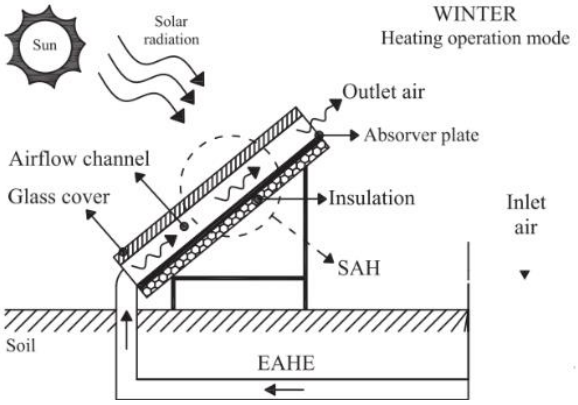
۲-۱۰- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – گرم کن هوایی خورشیدی[2]

در این روش که شماتیکی از آن در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در مناطق خیلی سرد و خشک می‌توان از این نوع سامانه‌های ترکیبی برای گرمایش محیط کاربر استفاده نمود. بدین صورت که هوای سرد با پیش گرم شدن به وسیله لوله‌های مبدل زمین به هوا وارد گرم کن هوایی خورشیدی می‌گردد. گرم‌کن خورشیدی از شیشه شفاف، صفحه جاذب و عایق تشکیل شده است تا بتواند حرارت و گرمای خورشید را به هوای پیش گرم شده منتقل کند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این نوع

[1] Solar Air Heating (SAH)

[2] Natural ventilation

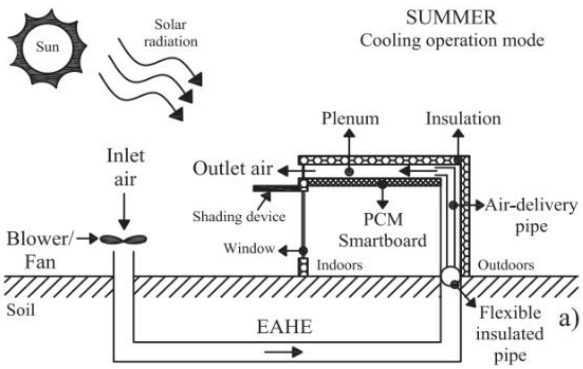
سامانه ترکیبی می‌تواند تا حدود ۳ برابر دمای هوای محیط را گرم کند. این نوع سامانه‌های ترکیبی علاوه بر گرمایش محیط می‌توانند در خشک کردن محصولات کشاورزی و دگیر اهداف صنعتی مورد استفاده قرار گیرند [۵].



شکل ۱۲ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا - گرم‌کن هوایی خورشیدی [۵]

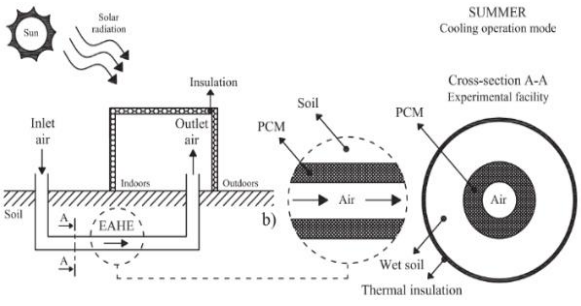
۲-۱۱- ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – مواد تغییرفاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌کردن/ آزاد کردن انرژی حرارتی در بیشتر بخش‌های ساختمان‌ها استفاده می‌شود. استفاده از مبدل‌های زمین به هوا با مواد تغییر فاز دهنده در اجزای ساختمان (شکل۱۳) و یا داخل لوله‌های مبدل زمین به هوا (شکل ۱۴) می‌تواند به بهبود شرایط آسایش حرارتی کمک کند. بدین صورت که اگر دمای هوای داخل محیط بیشتر از دمای مورد نظر باشد، حرارت را ذخیره نموده (فرایند شارژ) و به حالت مایع تبدیل می‌شود اگر دمای هوای داخل محیط کمتر باشد از دمای مورد نظر باشد حرارت به محیط داده می‌شود (فرایند تخلیه) و جامد می‌شود.



شکل ۱۳ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – مواد تغییرفاز دهنده در اجزای ساختمان [۵]

مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لوله منجر به افزایش بین ۲۹ تا ۴۰ درصدی ظرفیت سرمایش می‌گردد [۲۵].



شکل ۱۴ ترکیب مبدل حرارتی زمین به هوا – مواد تغییرفاز دهنده در لوله مبدل زمین به هوا [۵]

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله آخرین تحقیقات و پیشرفت‌های انجام شده بر روی سامانه‌های ترکیبی مبدل حرارتی زمین به هوا مطالعه گردید. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد این نوع سامانه‌های ترکیبی توانایی و پتاسیل خوبی برای کاهش مصرف انرژی ناشی از پیش گرم/گرم و پیش سرد/سرد کردن ساختمان‌ها دارند. با این حال تحلیل‌های زیست محیطی و انتخاب نوع سامانه ترکیبی با توجه به شرایط اقلیمی و آب هوایی منطقه مورد نظر به منظور دست یافتن به بیشترین عملکر حرارتی باید لحاظ شود. همچنین انتخاب صحیح و بهینه پارامترهای مؤثر طراحی برای هر کدام از این نوع سامانه‌های ترکیبی موجب صرفه‌جویی در مواد و مصالح مورد استفاده و در نتیجه هزینه‌های اجرا و راندمان بهینه می‌گردد که باید حتماً در مطالعات آتی در نظر گرفته شود.

۴- مراجع

[1] S. V. V. Raman, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of climate change, mitigation and adaptation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 878-897, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.009.

[2] E. Piaia, B. Turillazzi, R. Di Giulio, and R. Sebastian, "Advancing the Decarbonization of the Construction Sector: Lifecycle Quality and Performance Assurance of Nearly Zero-Energy Buildings," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3687, 2024, doi: https://doi.org/10.3390/su16093687.

[3] N. Soares *et al.*, "A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment,"

Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 77, pp. 845-860, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.027.

[4] Z. Liu *et al.*, "A state-of-the-art review on shallow geothermal ventilation systems with thermal performance enhancement system classifications, advanced technologies and applications," *Energy and Built Environment*, vol. 4, no. 2, pp. 148-168, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.003.

[5] N. Soares, N. Rosa, H. Monteiro, and J. Costa, "Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review," *Energy and Buildings*, vol. 253, p. 111532, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111532.

[6] S. K. Soni, M. Pandey, and V. N. Bartaria, "Hybrid ground coupled heat exchanger systems for space heating/cooling applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 724-738, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.125.

[7] D. D'Agostino, F. Esposito, A. Greco, C. Masselli, and F. Minichiello, "Parametric analysis on an earth-to-air heat exchanger employed in an air conditioning system," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2925, 2020, doi: https://doi.org/10.3390/en13112925.

[8] P. M. Congedo, C. Baglivo, S. Bonuso, and D. D'Agostino, "Numerical and experimental analysis of the energy performance of an air-source heat pump (ASHP) coupled with a horizontal earth-to-air heat exchanger (EAHX) in different climates," *Geothermics*, vol. 87, p. 101845, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101845.

[9] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agarwal, J. Mathur, and T. Aseri, "Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 531-535, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.049.

[10] S. L. Do, J.-C. Baltazar, and J. Haberl, "Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates," *Energy and Buildings*, vol. 103, pp. 206-215, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.043.

[11] H. Li, L. Ni, G. Liu, and Y. Yao, "Performance evaluation of Earth to Air Heat Exchange (EAHE) used for indoor ventilation during winter in severe cold regions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114111, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114111.

[12] A. Mardiana-Idayu and S. Riffat, "Review on heat recovery technologies for building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1241-1255, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026.

[13] A. O. Iman Shayegh, Amir Vadiee, "Study on Transient Thermal Performance and Recovery of an Earth to Air Heat Exchanger," Government - Ministry of Science, Research, and Technology - Shiraz University of Technology - Faculty of Mechanical Engineering [in persion], 1394. [Online]. Available: https://ganj.irandoc.ac.ir//#/articles/72b5eec236b82e6eb3d92aaa025aae0c/fulltext.

[14] A. Lapertot, M. Cuny, B. Kadoch, and O. Le Métayer, "Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs," *Energy and Buildings*, vol. 235, p. 110702, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110702.

[15] G. Heidarinejad, V. Khalajzadeh, and S. Delfani, "Performance analysis of a ground-assisted direct evaporative cooling air conditioner," *Building and Environment*, vol. 45, no. 11, pp. 2421-2429, 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.009.

[16] S. Ahmadi, M. Irandoost Shahrestani, S. Sayadian, M. Maerefat, and A. Haghighi Poshtiri, "Performance analysis of an integrated cooling system consisted of earth-to-air heat exchanger (EAHE) and water spray channel," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 143, pp. 473-483, 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s10973-020-09268-9.

[17] V. Bansal and J. Mathur, "Performance enhancement of earth air tunnel heat exchanger using evaporative cooling," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 150-158, 2009, doi: https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp017.

[18] V. Khalajzadeh, M. Farmahini-Farahani, and G. Heidarinejad, "A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 604-610, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.009.

[19] N. Nemati, A. Omidvar, and B. Rosti, "Performance evaluation of a novel hybrid cooling system combining indirect evaporative cooler and earth-air heat exchanger," *Energy*, vol. 215, p. 119216, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119216.

[20] F. E. Nia, D. Van Paassen, and M. H. Saidi, "Modeling and simulation of desiccant wheel for air conditioning," *Energy and buildings*, vol. 38, no. 10, pp. 1230-1239, 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.020.

[21] A. Minaei, M. Ghanizadeh, and H. Ghaebi, "Simulation and Performance Evaluation of Desiccant Cooling System Coupled to an Earth-to-

Air Heat Exchanger," *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 46-63, 2023, doi: https://doi.org/10.52547/jrenew.10.2.46.

[22] F. Jomehzadeh *et al.*, "A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 736-756, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254.

[23] A. M. Akbarpoor, A. H. Poshtiri, and F. Biglari, "Performance analysis of domed roof integrated with earth-to-air heat exchanger system to meet thermal comfort conditions in buildings," *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 1265-1293, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.110.

[24] N. A. Elminshawy, A. Mohamed, K. Morad, Y. Elhenawy, and A. A. Alrobaian, "Performance of PV panel coupled with geothermal air cooling system subjected to hot climatic," *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1-9, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.027.

[25] T. Zhou, Y. Xiao, H. Huang, and J. Lin, "Numerical study on the cooling performance of a novel passive system: Cylindrical phase change material-assisted earth-air heat exchanger," *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, p. 118907, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118907.