سال دوم، شماره دوم، زمستان ۱۳۹۴، ص ص ۱- ۱۲
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
renemag.ir
مقاله
تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۰۱
تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۰۵

تأمین بار حرارتی و برودتی مورد نیاز ساختمان‌ها با استفاده از انرژی ذخیره شده در پوسته زمین با کمک سامانه کانال‌های زیرزمینی هوا

امیر امیدوار[۱*]، امیر ودیعی[۱]، ایمان شایق[۲]

۱- استادیار، رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز
* شیراز، صندوق پستی ۳۱۳-۷۱۵۵۵ ، omidvar@sutech.ac.ir

چکیده

در این مقاله ابتدا ویژگی‌های مبدل‌های حرارتی هوا – زمین شامل روش‌های استفاده از این سامانه، نحوه چیدمان کانال‌ها و همچنین مهمترین معایب و مزایای استفاده از این سامانه به طور کامل بررسی شده است. سپس سامانه‌های غیرفعال که قابلیت ترکیب شدن با کانال‌های زیرزمینی را دارند مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز مهمترین تحقیقات صورت گرفته در چند دهه اخیر بر روی این سامانه، به منظور دستیابی به نقاط قوت و ضعف تحقیقات گذشته و همچنین ارائه ایده‌های نوین و مشخص کردن خط مشی تحقیقات آینده صورت گرفته است. بررسی نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد، از این سامانه می‌توان علاوه بر کاربرد سرمایشی در تابستان، به عنوان سیستم پیش‌گرمایشی در زمستان نیز استفاده نمود. هرچند که در مجموع، سامانه در کاربرد سرمایشی از کارایی مناسب‌تری برخوردار است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در صورت به‌کارگیری این سامانه در سیستم‌های ترکیبی، کارایی کلی سیستم به شدت افزایش خواهد یافت.

کلیدواژگان: مبدل‌های حرارتی هوا – زمین، طراحی کانال‌های زمینی، اشباع حرارتی خاک

Cooling and heating of buildings with ground source energy using earth-air heat exchangers

Amir Omidvar[۱*], Amir Vadiee[۱], Iman Shayegh[۲]

۱- Assistant Professor, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.
۲- MSc student, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran
* P.O.B. ۷۱۵۵۵-۳۱۳ Shiraz, Iran, omidvar@sutech.ac.ir
Received: ۲۲ December ۲۰۱۵ Accepted: ۲۵ January ۲۰۱۶

Abstract

In the present paper, the earth-air heat exchanger specification including system utilization methods, channels configuration as well the most important merits and demerits of this system has been assessed completely. Then, passive systems which can be integrated with the underground channels has been assessed. Eventually, the significant recent decades studies on earth-air heat exchanger has been evaluate in order to obtain the worth and weak points of the past researches as well as proposing the novel ideas and set the further studies policy. The former studies evaluation shows that the earth-air heat exchanger can be utilized in summer for cooling purpose and also it can be used as preheating system in winter. However, this system has higher performance as a cooling system. The results indicated that by considering the earth-air heat exchanger in the hybrid systems, the total system performance will be improved incredibly.

Keywords: Earth-air heat exchanger, Underground channel design, Soil thermal saturation

۱- مقدمه

تاکنون تحقیقات متنوع و گسترده‌ای بر روی کانال‌های زیرزمینی انجام شده است، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد روند این تحقیقات در ۲۵ سال گذشته با شدت بیشتری دنبال شده است. در این مقاله سعی شده است مهمترین تحقیقات انجام شده بر روی کانال‌های زیرزمینی از سال ۱۹۹۰ تا جولای ۲۰۱۵ که بیشترین موارد ارجاع را در سطوح بین المللی به خود اختصاص داده‌اند از منظر روش‌های حل، نوع کاربرد، مدل‌سازی و نتایج تحقیقات مورد بررسی قرار گیرند و نقاط ضعف و قوت آن‌ها بایکدیگر مقایسه شود.

۱-۲- انرژی زمین‌سرمایی و تاریخچه استفاده از آن

انسان‌ها از زمان‌های گذشته از پتانسیل حرارتی و برودتی زمین جهت تعدیل شرایط نامطلوب آب و هوایی و تامین شرایط آسایش بهره گرفته‌اند. طراحان ساختمان‌های قدیمی تمدن‌های کهن، از این حقیقت استفاده نموده‌اند، هرچند که اطلاعات آن‌ها بیشتر بر مبانی داده‌های تجربی بوده و از قوانین و اصول مهندسی امروزی در علوم حرارتی آگاهی نداشته‌اند. به عنوان نمونه در تونس و شرق اسپانیا برای رهایی از اقلیم گرم و بیابانی و در شمال چین برای رهایی از سرمای سخت و طاقت‌فرسای زمستان، خانه‌های بزرگی در زیر زمین ساخته می‌شد. اما یکی از بهترین نمونه‌ها در این مورد، روستای صخره‌ای کندوان می‌باشد که در شمال شرق ایران و در ارتفاع‌های کوه سبلان واقع شده است. این روستا به دلیل شکل خانه‌های آن که مانند کندوی عسل در دل کوه کنده شده‌اند، کندوان نامیده می‌شود. کندوان که قدمتی ۷۰۰ ساله دارد، یکی از سه روستای صخره‌ای جهان است که به دلیل واقع شدن در دل کوه از انرژی زمین بهره می‌جوید؛ با این وجود کندوان به دلیل معماری بی‌نظیر و ساخت شدن تمامی قسمت‌های آن شامل خانه‌ها، دیوارها، تاقچه‌ها و جای درها و پنجره‌ها با تیشه دستی در دل صخره‌ها از چنان استحکامی برخوردار بوده است که زندگی مردم امروزی نیز در این بافت قدیمی همچنان ادامه دارد و از این نظر نسبت به دو مورد دیگر (کاپادوکیه در ترکیه و داکوتا در آمریکا) یک استثنا به حساب می‌آید. نمونه‌های قدیمی دیگری که از انرژی زمین سرمایی در معماری آن‌ها استفاده شده است می‌توان به زیرزمین‌ها، سردابه‌ها، وگودال باغچه‌های مناطق گرم و خشکی مانند یزد و شوادان‌های مناطق گرم و مرطوب مانند دزفول، اشاره کرد.

استفاده از این‌گونه روش‌ها و فنون بی‌نظیر در معماری سنتی باعث شده است که معماران ساختمان‌های امروزی نیز از این روش‌ها در طراحی ساختمان‌ها بهره جویند. یکی از مهمترین آن‌ها استفاده از ساختمان‌های زمین‌پناه[۱] می‌باشد. در این روش سعی می‌شود با قرار دادن ساختمان به طور کامل در عمق زمین، یا بردن بخشی از آن به زیر سطح خاک و یا بالا آوردن خاک از سطح زمین، از مزایای تماس مستقیم بنا با زمین بهره جست. ساختمان‌های زمین‌پناه نیز مانند بسیاری از طراح‌های دیگر مزایا و معایبی دارند. این گونه بناها نسبت به ساختمان‌های معمولی با شدت کمتری از دمای هوای بیرون تاثیر می‌پذیرند. همچنین علاوه بر اینکه مانع نفوذ صدا به داخل ساختمان می‌شوند، در برابر بلایای طبیعی مانند بادهای تند،طوفان‌های شدید و گردبادها، از استحکام بالاتری برخوردارند. از جنبه‌های منفی استفاده از اینگونه ساختمان‌ها نیز به هزینه اولیه ساخت‌وساز و افزایش سطح مراقبت-های مورد نیاز جهت جلوگیری از افزایش رطوبت و ایجاد میعان در سطوح داخلی دیوارها که ممکن است رشد قارچ و کپک را به همراه داشته باشد، اشاره کرد. به طور کلی در طراحی ساختمان‌های زمین پناه عوامل متعددی مانند اقلیم ، توپوگرافی، جنس خاک، سطوح آب‌های زیرزمینی، مصالح و مواد ساختمانی، میزان رطوبت هوا و امکان تهویه مناسب عوامل تعیین کننده‌ای در طراحی سامانه محسوب می‌شوند.

نمونه‌های متفاوتی از ساختمان زمین‌پناه در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است که از این بین می‌توان به خانه مالاتور در ولز انگلستان، خانه هابیت در سوئیس، خانه سنگی کویر در یونان و خانه گلبرگ در بولتون انگلستان اشاره کرد. اما یکی از شگفت انگیزترین ساختمان‌های از این دست، خانه غار در ایالت میسوری آمریکا با مساحت ۱۵ هزار فوت مکعب می‌باشد که به دلیل طراحی مناسب به هیچ‌گونه وسیله سرمایشی و گرمایشی احتیاج ندارد (شکل ۱).

شکل ۱ نمونه‌ای از ساختمان‌های زمین‌پناه امروزی (خانه غار در ایالت میسوری آمریکا)

۲- تشریح کانال‌های زیرزمینی و روش کارکرد آن

همان‌طور که ذکر شد استفاده از ساختمان‌های زمین‌پناه، جدا از هزینه‌های بالای آن، تنها تحت شرایط خاصی امکان‌پذیر است. بنابراین لازم است روش‌های دیگری برای استفاده از انرژی زمین‌سرمایی مطرح شود که محدودیت‌های کمتری در استفاده از آن وجود داشته باشد. یکی از این روش‌ها استفاده از کانال‌های زیرزمینی می‌باشد. ساختار اصلی استفاده از این سامانه بر پایه قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در خاک می‌باشد، به صورتی که توانایی ذخیره‌سازی حرارتی خاک، دارای تاخیر زمانی نسبت به درجه حرارت محیط بیرون می‌باشد و دمای خاک به نحوی تغییر می‌کند که در هوای گرم تابستان، اثر خنک‌کنندگی و در هوای سرد زمستان اثر گرم‌کنندگی داشته باشد.

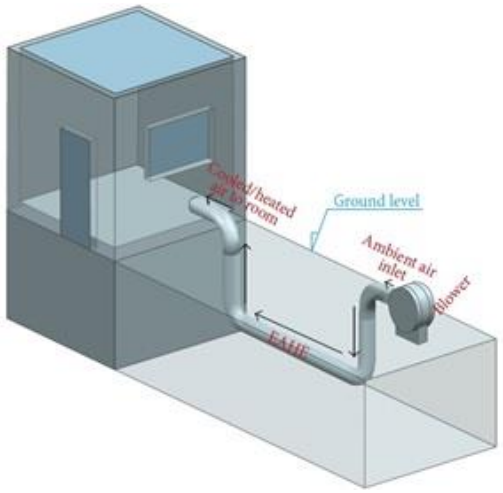
از کانال‌های زیرزمینی در موارد مختلفی استفاده می‌شود که بسته به نوع سیال مورد استفاده می‌توان از آن به عنوان یک سیستم سرمایشی مستقیم و غیرمستقیم استفاده کرد. در صورتی که از هوا به عنوان سیال عبوری در کانال‌ها استفاده شود، این سامانه را مبدل‌های حرارتی هوا - زمین می‌نامند.

به طور کلی مبدل‌های حرارتی هوا - زمین لوله‌ها و کانال‌های هوایی هستند که درعمق مشخصی از زیر سطح زمین قرار گرفته و هوای بیرونی پس از عبور از آن و تبادل انرژی با خاک اطراف، وارد ساختمان می‌شود. هوای عبوری ازکانال‌های زیرزمینی از طریق تبادل انرژی با خاک اطراف آن، تغییر دما داده و با دمایی نزدیک‌تر به دمای آسایش، وارد ساختمان می‌شود. همان‌گونه که ذکر شد به دلیل اینرسی حرارتی بالای خاک، درجه حرارت آن نسبت به دمای هوای بیرون دارای تاخیر زمانی بوده و در زیر سطح زمین نسبت به هوای بالای سطح زمین در تابستان خنک‌تر، و در زمستان گرم‌تر می‌باشد.

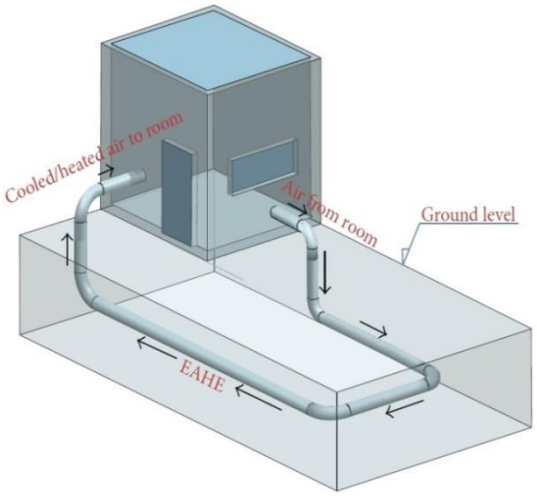
۱. Earth-Sheltered Buildings

۲-۱- روش استفاده از مبدل‌های حرارتی هوا – زمین

معمولاً به دو طریق مختلف از مبدل‌های حرارتی هوا - زمین استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، در روش اول از یک سیستم حلقه باز استفاده می‌شود به نحوی که هوا با عبور از کانال‌های زیر زمینی خنک شده و پس از خنک کردن فضای اتاق از درها و پنجره ها به فضای بیرون تخلیه می‌شود.



شکل ۲ مبدل حرارتی هوا - زمین در سیستم حلقه باز [۱].



شکل ۳ مبدل حرارتی هوا - زمین در سیستم حلقه بسته [۱].

در روش دوم که در شکل ۳ نمایش داده شده است، از یک سیستم حلقه‌بسته استفاده می‌شود. به این ترتیب که هوای خروجی از مبدل حرارتی هوا - زمین و ورودی به اتاق پس از خنک کردن آن، مجدداً مورد استفاده قرار گرفته و در یک سیکل چرخشی دوباره وارد مبدل حرارتی هوا - زمین می‌گردد. هرچند که استفاده از این روش باعث می‌شود از ظرفیت سرمایشی زمین به صورت بهینه استفاده شود، اما به دلیل آنکه کیفیت هوای داخل اتاق به‌شدت افت می‌کند و در سیکل چرخشی هوای تازه به اتاق تزریق نمی‌شود، عملاً استفاده از این روش بدون به‌کارگیری تجهیزات جانبی امکان‌پذیر نخواهد بود.

۲-۲- چیدمان مبدل‌های حرارتی هوا – زمین

نحوه چیدمان کانال‌های مبدل‌های حرارتی هوا - زمین بسته به عوامل مختلفی مانند فضای مورد نیاز و میزان افت افشار، کارایی سامانه و عوامل دیگر تعیین می‌شود. در شکل ۴ سه نوع چیدمان سری، موازی و پیچشی ترسیم شده است. علاوه بر این سه حالت که کانال‌ها در عمق مشخصی از سطح زمین و به صورت افقی نصب می‌شوند در مواردی که امکان استفاده از این روش وجود نداشته باشد، کانال‌ها به صورت عمودی نصب می‌شود.

شکل ۴ انواع چیدمان مبدل‌های حرارتی – زمین

۲-۳- مزایای استفاده از کانال‌های زیرزمینی

۱- بر خلاف برخی از سامانه‌های غیرفعال دیگر که تنها در یکی از فصول سرد یا گرم سال امکان استفاده از آن وجود دارد، این سامانه می‌تواند در فصول سرد سال برای پیش‌گرمایش و در فصول گرم سال برای سرمایش مورد استفاده قرار گیرد.

۲- یکی از مهمترین مزایای استفاده از این سامانه قابلیت گسترده در ترکیب‌شدن با سایر سامانه‌های فعال و غیرفعال می‌باشد. به عنوان نمونه تاکنون در تحقیقات انجام گرفته قابلیت ترکیب این سامانه با هواکش خورشیدی، بادگیر، سقف‌های گنبدی و سیستم‌های خنک کننده تبخیری مستقیم و غیرمستقیم مورد آزمایش قرار گرفته است[۲-۷].

۳- با توجه به غیرفعال بودن این سامانه و استفاده از انرژی سرمایشی و گرمایشی فصلی خاک، این سامانه کاملا تجدیدپذیر بوده و با محیط‌زیست نیز سازگار می‌باشد.

۴- در صورت استفاده گسترده از این سامانه نه‌تنها از آلودگی محیط زیست جلوگیری به عمل می‌آید، بلکه امکان صرفه جویی ارزی به دلیل عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز امکان‌پذیر خواهد بود. به عنوان نمونه تحقیقاتی که در هند انجام شده است نشان می‌دهد که زمان بازگشت انرژی برای یک مبدل حرارتی هوا – زمین در این منطقه با کانالی از جنس PVC، وزن ۵۷/۵ کیلوگرم، طول ۱۹/۲۳ متر و دمنده‌ای با قدرت ۰/۵ اسب بخار، ۱/۲۹ سال به طول می‌انجامد؛ به این مفهوم که حدود ۱۶۶۴ کیلووات ساعتی که هزینه ساخت بخش‌های مختلف این سامانه می‌شود به کمک صرفه‌جویی ایجاد شده در مصرف انرژی در بخش سرمایش و پیش‌گرمایش، حدود یک سال و سه ماه پس از استفاده، بازگردانده می‌شود. در این تحقیقات همچنین ذکر شده است که اگر طول عمر یک سیکل مبدل زمینی حدود ۵۰ سال باشد، در این مدت می‌تواند از صدور بیش از ۱۰۱ تن دی‌اکسید-کربن جلوگیری کرده و بیش از ۲۸۰۰ دلار در مصرف انرژی صرفه‌جویی به عمل آورد [۸].

۵- با توجه به مشکلات عمده در تامین نیاز انرژی برای مناطق محروم و دور افتاده روستایی و سهولت استفاده از این سامانه در

نصب و به کارگیری آن، می‌توان با متصل کردن آن با سایر سامانه‌های غیرفعال، نیاز سرمایشی و گرمایشی این مناطق را با صرف کمترین هزینه تامین کرد.

۲-۴- عمده‌ترین مشکلات استفاده از مبدل‌های حرارتی هوا - زمین

این سامانه نیز مانند بسیاری از سامانه‌های طبیعی و سیستم‌های سرمایشی، خالی از ایراد نمی‌باشد. ایراداتی اساسی که در صورت عدم دستیابی به راه حل مناسب برای برطرف کردن آن‌ها، استفاده از این سامانه را به‌شدت محدود کرده و حتی در برخی شرایط غیرممکن می‌سازد. در ادامه به دو مورد از عمده‌ترین مشکلات این سامانه اشاره می‌شود.

۲-۴-۱ افت عملکرد سامانه در استفاده دائمی

یکی از چالش‌های فراروی استفاده از مبدل‌های زمینی، کاهش شدید عملکرد سامانه در طولانی مدت است؛ به نحوی که در صورت به‌کارگیری مداوم از این سیستم خاک اطراف به تدریج از هوای عبوری از لوله‌ها تاثیر می‌پذیرد، و دمای خاک دچار تغییر می‌شود که در نتیجه آن، باعث می‌شود کارایی سیستم پس از مدتی کاهش یابد. بنابراین نکته‌ای که کمتر در تحقیقات گذشته مدنظر قرار گرفته و از عمده‌ترین مشکلات مبدل‌های حرارتی هوا - زمین می‌باشد، موضوع کاهش عملکرد این سامانه پس از استفاده‌ی طولانی‌مدت می‌باشد. در واقع پارامتر عملکرد سامانه نسبت به زمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین باید راهکارهایی ارائه شود تا بتوان پس از محاسبه و شناسایی میزان کاهش عملکرد سامانه، تا حد امکان از این افت عملکرد، که با گذشت زمان به وجود می‌آید، جلوگیری کرد.

۲-۴-۲ حجیم بودن سامانه

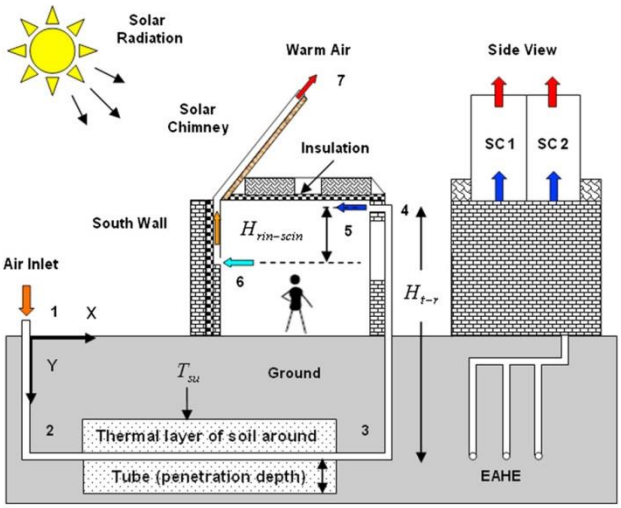
یکی دیگر از مشکلات استفاده از سامانه مبدل‌های حرارتی زیرزمینی، حجیم بودن سامانه است. به این منظور که جهت دستیابی به کارایی مناسب، لازم است علاوه بر اینکه از کانال‌ها و لوله‌هایی طویل استفاده شود، فضای لازم برای نصب این کانال‌ها در فاصله مناسب نسبت به یکدیگر نیز موجود باشد. بنابراین با توجه به اینکه فضای زیادی برای نصب این سامانه مورد نیاز می‌باشد، امکان بکارگیری و استفاده از آن در آپارتمان‌ها و ساختمان‌های مسکونی با مشکلاتی همراه خواهد بود. لذا یکی از چالش‌های عمده برای طراحان این سامانه این است که تا حدامکان فضای لازم برای نصب سامانه را کاهش دهند. یکی از راه‌های پیشنهادی که تاکنون جهت حل این مشکل مطرح شده است استفاده از کانال‌های مرطوب زیرزمینی است. به نحوی که با خیس کردن سطح داخلی کانال‌ها و استفاده هم‌زمان از انرژی سرمایشی خاک و سرمایش تبخیری مستقیم، کارایی سامانه به حدی زیاد شود که امکان استفاده از کانال‌هایی با طول کمتر امکان پذیر باشد [۹]. اما با توجه به این که خیس کردن سطح داخلی کانال‌ها به مرور زمان باعث رشد قارچ‌ها و کپک‌ها می‌شود، استفاده از این روش، در مجموع چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

۳- سیستم‌های قابل ترکیب با مبدل‌های حرارتی هوا – زمین

همان‌گونه که ذکر شد، یکی از مهمترین مزایای استفاده از مبدل‌های حرارتی هوا - زمین قابلیت ترکیب شدن با سایر سیستم‌های فعال و غیرفعال می‌باشد. از آنجا که در صورت استفاده از کانال‌های زیرزمینی در سیستم‌های ترکیبی کارایی سامانه بهبود می‌یابد، استفاده از این سامانه در سیستم‌های ترکیبی در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در زیر به نمونه‌ای از این موارد که توسط سایر محققین مورد بررسی قرار گرفته است اشاره می‌شود.

۳-۱- ترکیب مبدل حرارتی هوا - زمین و هواکش خورشیدی

در این روش که شماتیکی از آن در شکل ۵ ترسیم شده است، با ترکیب هواکش خورشیدی[۱] و مبدل‌های حرارتی هوا - زمین علاوه بر سرمایش، تهویه طبیعی نیز انجام می‌شود. در این سامانه انرژی ناشی از جذب شار خورشیدی سبب گرم شدن هوای داخل هواکش و متعاقباً کاهش چگالی آن می‌شود. سپس نیروی شناوری ناشی از تفاوت چگالی میان هوای داخل و خارج هواکش، سبب مکش هوای داخل اتاق و در نتیجه عبور هوا از داخل مبدل حرارتی هوا - زمین می‌شود. بدین ترتیب دو فرآیند تهویه و سرمایش بطور همزمان محقق خواهند شد. برای ایجاد مکش‌طبیعی در هواکش خورشیدی از یک دیواره شیشه‌ای مشرف به جنوب و دیواره‌ای فلزی و تیره رنگ به عنوان سطح جاذب حرارت استفاده شده است. مبدل حرارتی هوا - زمین نیز متشکل از چند لوله طویل است که به صورت موازی، در عمق معینی از خاک و در فواصل مناسب نسبت به یکدیگر تعبیه شده است[۲].

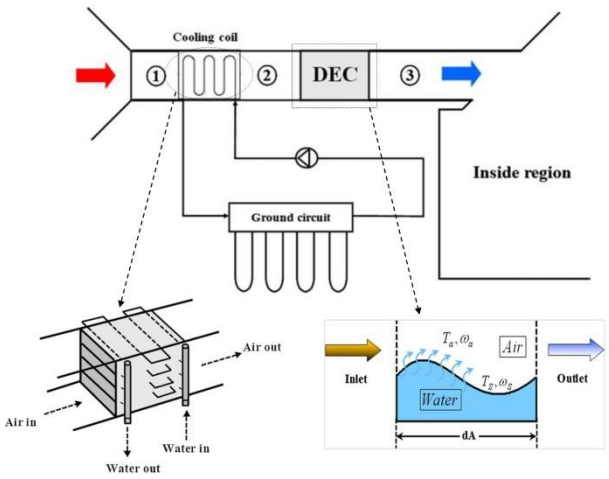


شکل ۵ ترکیب مبدل حرارتی هوا - زمین و هواکش خورشیدی [۲]

۳-۲- ترکیب کانال‌های زیرزمینی و خنک‌کننده تبخیری مستقیم

این سامانه از ترکیب سه سیستم مجزا شامل سیستم گردشی کوپل شده با زمین[۲]، کویل‌های سرمایشی[۳] و سیستم خنک‌کننده تبخیری مستقیم[۴] تشکیل شده است. در این سامانه ترکیبی، از کانال‌های زیرزمینی عمودی با چیدمان سری جهت تامین آب خنک کویل‌های سرمایشی استفاده شده است. لذا عملکرد این سامانه بر این اساس است که با تامین پیوسته آب خنک کویل‌های سرمایشی در یک سیستم گردشی، هوای عبوری از کویل‌های سرمایشی به صورت غیر مستقیم پیش‌سرد می‌شود. پس از آن با عبور هوای پیش سرد شده از سیستم خنک‌کننده تبخیری مستقیم و افزایش رطوبت، بشدت دچار کاهش دما می‌شود. تحقیقات انجام شده بر روی این سیستم نشان می‌دهد کارایی این سیستم بیش از ۱۰۰٪ بوده و این کارایی در مقایسه با سیستم سرمایش تبخیری مستقیم حدود ۳۵٪ بیشتر می‌باشد[۳].

۱. solar chimney
۲. Ground Coupled Circuit or GCC
۳. Cooling Coil Unit or CCU
۴. Direct Evaporative Cooling or DEC



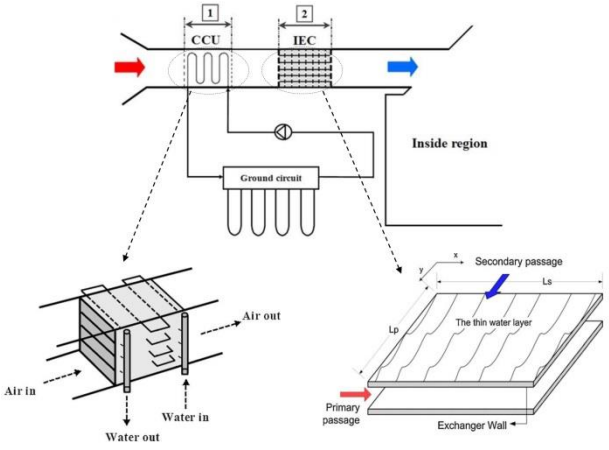
شکل ۶ ترکیب کانال‌های زیرزمینی و خنک‌کننده تبخیری مستقیم [۳]

۳-۳- ترکیب کانال‌های زیرزمینی و خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم

این سیستم ترکیبی، کاملاً مشابه سیستم ترکیبی ۳-۲ عمل می‌کند با این تفاوت که بجای استفاده از سیستم تبخیری مستقیم، از سیستم تبخیری غیرمستقیم[۱] استفاده شده است. سیستم تبخیری غیرمستقیم، از مجموعه‌ای از صفحات تشکیل شده است که بر روی هر کدام دو گذرگاه عمود بر هم تعبیه شده است و از هوا در هر یک از گذرگاه‌ها به صورت جداگانه استفاده می‌شود؛ به طوری که در گذرگاه ثانویه با اسپری کردن آب در بالای مبدل حرارتی، هوای ثانویه (هوای کاری) که از این گذرگاه عبور می‌کند خنک شده و با هوای پیش‌سرد شده (هوای اولیه) خروجی از کویل‌های سرمایشی، به صورت غیرمستقیم در تماس قرار می‌گیرد و دمای آن را کاهش می‌دهد [۴].

۴-۳- ترکیب مبدل حرارتی هوا - زمین و بادگیر

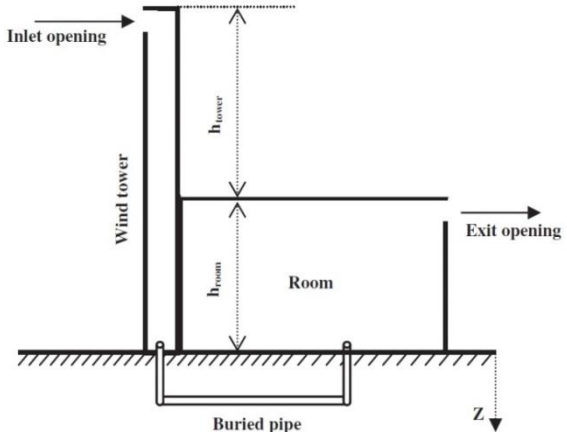
در این سیستم ترکیبی، از اتصال بادگیر و مبدل حرارتی هوا - زمین استفاده شده است. در صورت استفاده از این سیستم علاوه بر سرمایش، تهویه طبیعی هوای داخل ساختمان نیز به صورت غیرفعال انجام می‌شود. بر این اساس با ایجاد فشار مثبت در ورودی بادگیر و اختلاف فشار بوجود آمده بین این ناحیه و خروجی اتاق، هوا به داخل اتاق مکش می‌شود.



شکل ۷ ترکیب کانال‌های زیرزمینی و خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم [۴]

۱. Indirect Evaporative Cooling or IEC

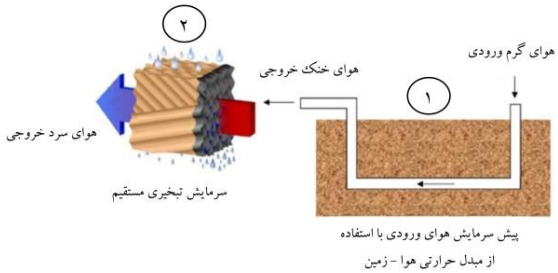
. بنابراین با ورود هوا به داخل بادگیر ابتدا هوای گرم محیط اندکی پیش سرد شده و سپس وارد مبدل حرارتی هوا - زمین می‌شود. در ارائه نتایج تحقیقات انجام شده بر روی این سامانه ترکیبی، ادعا شده است این سامانه قادر است در دماهای بسیار بالای محیط (۵۲/۵°C)، حدود ۲۰°C دما را کاهش دهد، این درحالی است که با استفاده از بادگیر با ستون خیس شونده (به تنهایی)، دمای هوا تنها ۷/۵°C کاهش یافته است[۵].



شکل۸ ترکیب بادگیر و مبدل حرارتی هوا - زمین [۵]

۵-۳ ترکیب مبدل حرارتی هوا - زمین و سیستم سرمایش تبخیری مستقیم

در این سیستم ترکیبی برخلاف سامانه اشاره شده در بخش ۳-۲، بجای استفاده از آب در کانال‌های زیرزمینی، از هوا استفاده شده است و همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شده در صورت استفاده از هوا در کانال‌های زیرزمینی، آن را مبدل‌های حرارتی هوا – زمین نام‌گذاری می‌کنند. عملکرد این سامانه که در شکل ۹ شماتیکی از آن ترسیم شده، بر این اساس است که هوای گرم محیط به کمک فن تعبیه شده در ابتدای کانال به داخل مبدل حرارتی هوا - زمین وارد می‌شود و ضمن عبور از کانال، به دلیل اختلاف دما با خاک اطراف، قسمتی از گرمای خود را به خاک می‌دهد و از این طریق پیش-سرد می‌شود. سپس این هوای پیش‌سرد شده با ورود به خنک‌کننده تبخیری مستقیم، با استفاده از انتقال جرم و انتقال حرارت با آب، علاوه بر افزایش رطوبت، به شدت دچار کاهش دما می‌شود[۶].



شکل۹ ترکیب مبدل حرارتی هوا - زمین و سیستم سرمایش تبخیری مستقیم [۶].

۴- بررسی و مروری مهمترین تحقیقات انجام شده بر روی کانال-های زیرزمینی

تاکنون تحقیقات متنوع و گسترده‌ای بر روی کانال‌های زیرزمینی انجام شده اما بررسی‌ها نشان می‌دهد روند این تحقیقات در ۲۵ سال گذشته با شدت بیشتری دنبال شده است. با بررسی این تحقیقات نه‌تنها با روش‌های گوناگون استفاده از این سامانه آشنا می‌شویم، بلکه با تحلیل نقاط ضعف و قوت آن‌ها،

داده‌ها و اطلاعات ارزشمندی بدست خواهد آمد که در استفاده بهینه از این سامانه و ارائه ایده‌های جدید بسیار موثر خواهد بود. در این قسمت سعی شده است مهمترین تحقیقات انجام شده بر روی کانال‌های زیرزمینی از سال‌های ۱۹۹۰ تا جولای ۲۰۱۵ که بیشترین موارد ارجاع را در سطوح بین المللی به خود اختصاص داده‌اند از منظر روش‌های حل، نوع کاربرد، مدل‌سازی و نتایج تحقیقات مورد بررسی قرار گیرند.

گوسامی و دالیوال [۱۰] در سال ۱۹۹۰ جهت تعیین درجه حرارت هوای خروجی کانال در ۲۴ ساعت اول شروع به کار سامانه، از روش عددی استفاده کردند و نتایج آن را با استفاده از روش تجربی به تایید رساندند. لازم به ذکر است نتایج تجربی ذکر شده در این پژوهش به‌دلیل دقت به‌کار رفته در روش انجام آزمایش و گزارش داده‌های ورودی و خروجی، یکی از بهترین تحقیقات انجام گرفته بر رو ی کانال زیرزمینی به روش تجربی می‌باشد که بارها در سایر تحقیقات، به این مقاله رجوع شده است

ترومب و همکاران [۱۱] در سال ۱۹۹۱ استفاده از لوله‌های مدفون زیرزمینی را به صورت تجربی مورد نقد و بررسی قرار دادند و از نتایج این تحقیق به منظور سرمایش طبیعی یک بیمارستان استفاده نمودند.

تزافریس و لیپاراکیس [۱۲] در سال ۱۹۹۲، با مقایسه نتایج تجربی با ۸ الگوریتم مختلفی که تا آن زمان برای پیش‌بینی راندمان مبدل‌های حرارتی هوا - زمین پیشنهاد شده بود، دقت هر کدام از روش‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق حساسیت هریک از مدل‌ها به درجه حرارت هوای ورودی، سرعت هوا، طول، قطر و عمق تعبیه سامانه بررسی شد. یکی از مدل-هایی که نسبت به سایر مدل‌ها از دقت خوبی برخوردار بوده است، مدل رودریگز می‌باشد که در آن با ثابت در نظر گرفتن دمای دیواره خارجی کانال و استفاده از روش تحلیلی، رابطه‌ای برای پیش‌بینی دمای هوای خروجی ارائه شده است.

یاکوویدس و میهالاکاکو[۱۳] در سال ۱۹۹۵ از مدل عددی کاملی جهت پیش‌بینی درجه حرارت هوای داخل کانال‌ها و خاک زیر ساختمان استفاده نمودند. این مدل به طور هم زمان قادر به توصیف فرآیند های انتقال جرم و حرارت، داخل لوله‌های زیرزمینی است. صحت الگوریتم پیشنهاد شده به کمک نرم افزار ترنسیس تایید شد.

سانتاموریس و همکاران[۱۴] در سال ۱۹۹۵ با حل عددی معادلات موازنه انرژی و انتقال جرم، تاثیرات طول، شعاع لوله‌های مدفون، سرعت عبور هوا در لوله‌ها و همچنین عمق تعبیه آنها بر راندمان حرارتی گلخانه بررسی نمودند.

کراتی و کریدر[۱۵] در سال ۱۹۹۶ از مدل تحلیلی ساده‌ای جهت تعیین راندمان و پتانسیل حرارتی کانال‌های هوای زیرزمینی استفاده نمودند. این مدل تنها می‌توانست تغییرات درجه حرارت هوای خروجی از کانال در طول یک شبانه روز را پیش‌بینی کند. در این بررسی به منظور تعیین اثر قطر هیدرولیکی و نرخ جریان هوا بر میزان انتقال حرارت، از تحلیل پارامتریک استفاده شد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این مدل تنها زمانی قابل-اعتماد است که هوای داخل کانال دچار میعان نشود (در مواردی که رطوبت هوای محیط زیاد باشد امکان میعان وجود دارد). نتایج این بررسی نشان داد که افزایش قطر هیدرولیکی در مقایسه با افزایش سرعت هوا به مراتب به نتیجه بهتری منجر خواهد شد.

اینالی[۱۶] در سال ۱۹۹۸ مخزن استوانه‌ای عمودی واقع در زیر سطح زمین را به صورت تئوری مورد تحلیل قرار داد. در این تحلیل، توزیع درجه حرارت خاک دو بعدی در نظر گرفته شد و جهت حل مسئله، از رهیافت تبدیل فوریه و روش اجزای محدود استفاده شد.

تیواری و همکاران[۱۷] در سال ۱۹۹۸ راندمان حرارتی این سامانه برای گلخانه را بر حسب نوع گیاه تحت پرورش و به صورت تحلیلی محاسبه نمودند.

چنگ و همکاران[۱۸] در سال ۱۹۹۹ انتقال حرارت از لوله‌های مدفون زیرزمینی را با فرض ثابت بودن درجه حرارت دیواره لوله‌ها، با مدلی تحلیلی بررسی نمودند. در این روش با حل عددی معادله دیفرانسیل حاکم، توزیع درجه حرارت در خاک اطراف کانال و درجه حرارت هوای خروجی از آن بدست آمد.

هلمولر و لاچال[۱۹] در سال ۲۰۰۱ سرمایش و پیش‌گرمایش بوسیله لوله‌های مدفون زیرزمینی را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق بر خلاف تحلیل‌های پیشین که تنها با در نظر گرفتن حرارت محسوس به انجام رسیده بود، تغییرات انرژی محسوس و نهان هوای داخل کانال بررسی گردید. در این بررسی، درجه حرارت سطح کانال‌های زیرزمینی در طول آن ثابت فرض شده است.

کاباشینکف و همکاران[۲۰] در سال ۲۰۰۲ از مدل ریاضی جدیدی جهت محاسبه درجه حرارت خاک و هوای داخل مبدل حرارتی هوا - زمین استفاده نمودند. در این تحقیق تغییرات راندمان مبدل حرارتی، با کاهش فاصله میان لوله‌ها برآورد شد.

پاپه و همکاران[۲۱] در سال ۲۰۰۳ به طراحی ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی هوا - زمین را بررسی نمودند. در این بررسی، رابطه‌ای تحلیلی که ارتباط دهنده مشخصات هندسی و حرارتی سامانه با افت فشار مجاز است، ارائه گردید. در این تحقیق نیز درجه حرارت سطح کانال ها ثابت فرض شده است.

گسال و همکاران[۲۲] در سال ۲۰۰۴ با استفاده از مدلی تحلیلی و ساده، راندمان مبدل حرارتی هوا - زمین را در ارتباط با یک گلخانه و در طول یک سال بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که متوسط درجه حرارت هوای داخل گلخانه در زمستان در حدود ۶ تا ۷ درجه بیشتر و در تابستان حدود ۳ تا ۴ درجه کمتر از گلخانه مشابهی است که از مبدل حرارتی هوا - زمین استفاده نمی‌کند.

مدل ارائه شده توسط لی و همکاران[۲۳] در سال ۲۰۰۵ بر اساس محاسبه انتقال حرارت و جرم در خاک استوار است. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلفی نظیر رطوبت و ویژگی‌های حرارتی خاک، مورد بررسی قرار گرفت و جهت حل عددی معادلات حاکم از نرم‌افزار اوتاو۲[۱]، استفاده شد.

کومار و همکاران[۲۴] در سال ۲۰۰۶ برای حل عددی معادلات حاکم بر عملکرد مبدل حرارتی هوا - زمین از روش شبکه عصبی استفاده نمودند. در این تحقیق، اثر شش متغیر رطوبت، طول، درجه حرارت هوای محیط، درجه حرارت سطح زمین، درجه حرارت خاک در عمق تعبیه و دبی جرمی هوا در کانال‌ها بر راندمان حرارتی سامانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مدل حاصل در پیش‌بینی درجه حرارت هوای خروجی از مبدل، تنها حدود ۲/۶ ٪ خطا دارد.

کومار و همکاران[۲۵] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی برای طراحی بهینه مبدل حرارتی هوا - زمین ارائه نمودند. در این تحقیق، اثر چهار پارامتر رطوبت، درجه حرارت هوای محیط، درجه حرارت

۱. Autough۲

سطح زمین و درجه حرارت خاک در عمق تعبیه سامانه، بر درجه حرارت هوای خروجی از کانال‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که درجه حرارت هوای خروجی از کانال‌ها قویاً متاثر از دو پارامتر درجه حرارت هوای محیط و درجه حرارت خاک در عمق تعبیه سامانه است.

کوکومو و همکاران[۲۶] در سال ۲۰۰۸ به منظور محاسبه راندمان مبدل حرارتی هوا - زمین از مدل تحلیلی، یک بعدی و گذرا استفاده نمودند. این مدل با نوشتن معادله بالانس جرم و حرارت و در نظر گرفتن پروفیل حرارتی مناسبی برای خاک بدست آمده است. لازم به ذکر است با استفاده از این مدل، علاوه بر درجه حرارت هوای داخل مبدل، درجه حرارت خاک در نزدیکی آن نیز قابل پیش‌بینی است.

تیتلین و همکاران[۲۷] در سال ۲۰۰۹ از مدلی عددی، جهت شبیه‌سازی عملکرد مبدل حرارتی هوا - زمین استفاده نمودند. در این مدل به منظور کاهش زمان محاسبات، از روش فاکتور پاسخ جهت حل مسئله هدایت حرارتی دو بعدی در خاک استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل با نتایج حل سه بعدی و تحلیلی نشان میدهد که نتایج مدل حاضر در مقایسه با مدل‌های تحلیلی، انطباق بیشتری با حل سه بعدی دارد.

ژانگ و حقیقت[۲۸] در سال ۲۰۰۹ جهت بررسی رفتار حرارتی کانال زیرزمینی با مقطع مستطیل، از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی استفاده نمودند. نتایج بحث و بررسی پارامتریک نشان داد که تغییرات درجه حرارت سطح کانال و شدت توربولانس جریان هوا در ورودی، اثر چندانی بر عدد ناسلت جریان ندارند.

بانسال و همکاران[۲۹] در سال ۲۰۰۹ استفاده از مبدل حرارتی هوا - زمین به منظور کاهش بار حرارتی مورد نیاز ساختمان در فصل زمستان را بررسی نمودند. در این تحقیق جهت محاسبه راندمان سامانه، از مدلی عددی و گذرا استفاده شد و اثر پارامترهایی نظیر جنس لوله و سرعت هوا بر عملکرد سامانه، بررسی گردید.

چل و تیواری[۷] در سال ۲۰۰۹ عملکرد سامانه متشکل از مبدل حرارتی هوا - زمین و سقف گنبدی در تهویه فضای داخل یک ساختمان را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سامانه مذکور، درجه حرارت هوای داخل ساختمان در طول تابستان و زمستان به ترتیب حدود ۵ تا ۱۵ درجه کمتر و بیشتر از درجه حرارت محیط بیرون خواهد بود.

معرفت و حقیقی [۲] در سال ۲۰۱۰ عملکرد سرمایشی سیستم ترکیبی مبدل حرارتی هوا - زمین به همراه هواکش خورشیدی را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با به‌کارگیری تعداد کافی از لوله‌های مبدل حرارتی هوا - زمین و هواکش های خورشیدی و ترکیب درست آن‌ها، در صورتی که حتی دمای بیرون به ۴۵°C نیز برسد، می‌توان از طریق این سیستم آسایش حرارتی را در داخل ساختمان تامین کرد.

حیدری‌نژاد و همکاران [۳] نیز در سال ۲۰۱۰ به بررسی سیستم ترکیبی سرمایش تبخیری مستقیم و مبدل حرارتی عمودی زمینی با سیال آب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دمای هوای خروجی از سامانه ترکیبی حتی از دمای حباب تر محیط نیز پایین‌تر می‌باشد. در این سامانه از آب به عنوان سیال عبوری از کانال‌های زیرزمینی استفاده شد.

دارکوا و همکاران[۳۰] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عددی و تجربی سیستم مبدل حرارتی هوا - زمین در چین پرداختند و نتیجه گرفتند که سیستم مورد آزمایش این توانایی را دارد که ۸۶٪ بار سرمایشی ساختمان را در تابستان و ۶۲٪ بار گرمایشی ساختمان را در زمستان تامین کند.

میوهلیسن[۳۱] نیز در سال ۲۰۱۱ با تخمین دمای خاک در اعماق و زمان‌های مختلف و اعمال مقاومت‌های حرارتی، رابطه‌ای برای محاسبه دمای هوای خروجی کانال و همچنین محاسبه طول کانال جهت طراحی سامانه پیشنهاد کرده است. در این تحقیق نیز دمای دیواره خارجی کانال برای کانال‌های در محدوده طولی ۱۰m تا ۵۰m، ثابت و برابر دمای خاک در نظر گرفته شده است.

خلج زاده و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۲ مدل سرمایشی ارائه کردند و با ترکیب مبدل‌های زمینی عمودی و سرمایش تبخیری غیر مستقیم برای تابستان تهران، به این نتیجه رسیدند که اثر خنک کنندگی سیستم ترکیبی به مراتب بیشتر از هر کدام از سیسم ها به صورت جداگانه است. در واقع در این طرح جهت افزایش بازده سرمایش تبخیری غیر مستقیم از ظرفیت سرمایشی زمین استفاده شده است. در این سامانه نیز از آب به عنوان سیال عبوری از کانال‌های زیرزمینی استفاده شد.

الکساندر فرر و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۱۳ عملکرد مبدل‌های زیرزمینی را بر اساس آرایش لوله‌ها از طریق مدلی یک بعدی بررسی کردند و نشان دادند در صورت طبقه‌بندی لوله‌ها به صورت لایه‌های دوگانه و سه‌گانه، به ترتیب می‌توان ۵۰٪ و ۶۷٪ از فضای مورد نیاز جهت نصب لوله‌ها را کاهش داد.

کلارا پرتی و همکاران[۳۳] در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای مروری الگوریتم-های انتقال حرارت، مدل‌های پیشبینی عملکرد و نرم افزارهایی که تاکنون جهت مدل‌سازی و تحلیل عملکرد مبدل‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است را مورد بررسی قرار دادند.

روت داسیلوا برام و همکاران[۳۴] در سال ۲۰۱۳ مدل محاسباتی جدیدی را ارائه کردند که قادر است رفتار حرارتی مبدل‌های هوا - زمین را پیش‌بینی کند. این مدل در عین حال که قادر است پارمترهای طراحی را به‌خوبی بررسی کند، به تلاش محاسباتی کمتری نیز، نیازمند است به طوری که در حدود ۴۵٪ در زمان پردازش صرفه جویی خواهد شد.

میسرا، بانسال و سایر همکاران [۳۵-۳۸] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش عددی و مدلی ناپایا (گذرا)، مجموعه‌ای از تحقیقات را جهت بررسی عملکرد مبدل‌های حرارتی هوا - زمین در تابستان و زمستان انجام دادند. در این تحقیقات جهت مقایسه عملکرد سامانه در حالت پایا و ناپایا(گذرا) از پارامتر فاکتور کاهش[۱] استفاده شده است. در این تحقیقات تا حدودی به موضوع گرم شدن خاک اطراف کانال پرداخته شده است، اما مشکل که در این تحقیقات دیده می‌شود این است که بازه زمانی که سیستم به صورت ناپایا(گذار) مورد تحلیل قرار گرفته است بسیار کوتاه بوده است(حداکثر در ۲۴ ساعت اول کارکرد سامانه بررسی شده است) که این موضوع باعث شده است افت عملکرد سامانه نسبت به زمان مورد بررسی قرار نگیرد.

اگزامن و همکاران[۳۹] در سال ۲۰۱۴، تاثیر عایق‌بندی بخش‌های انتهایی کانال‌های زیرزمینی را بر روی عملکرد حرارتی مبدل‌های زمینی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند در صورت استفاده از این روش در تابستان، دمای خروجی کانال حدود ۵°C کاهش می‌یابد.

لی و همکارن [۴۰] در سال ۲۰۱۴ به کمک نرم افزار تریس ۷۰۰[۲] و همچنین به صورت تجربی، با استفاده از ترکیب دودکش خورشیدی و مبدل‌های حرارتی هوا - زمین ثابت کردند که می‌توان آسایش حرارتی را با استانداردهای اشری فراهم نمود.

۱. Derating Factor
۲. TRACE ۷۰۰

جدول ۱ مهمترین تحقیقات انجام شده از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۸

	سال	محقق	سامانه	نوع کاربرد	هدف تحقیق		روش مورد بررسی		
					مدل سازی	تحلیل عملکرد	تجربی	تحلیلی	عددی
۱	۱۹۹۰	گوسامی و دالیوال [۱۰]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش	✓		✓		✓
۲	۱۹۹۱	ترومب و همکاران [۱۱]				✓	✓		
۳	۱۹۹۲	تزافریس و لیپاراکیس [۱۲]				✓	✓		
۴	۱۹۹۵	یاکوویدس و میهالاکو [۱۳]	کانال‌های زیرزمینی با خاک مرطوب	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓				✓
۵	۱۹۹۶	سانتاموریس و همکاران [۱۴]		سرمایش		✓			✓
۶	۱۹۹۶	کرارتی و کریدر [۱۵]	کانال‌های زیرزمینی		✓	✓		✓	
۷	۱۹۹۸	اینالی [۱۶]	کانال‌های زیرزمینی عمودی	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓			✓	✓
۸	۱۹۹۸	تیواری و همکاران [۱۷]	کانال‌های زیرزمینی	پیش‌گرمایش در گلخانه		✓		✓	
۹	۱۹۹۹	چنگ و همکاران [۱۸]		سرمایش و پیش‌گرمایش	✓	✓		✓	
۱۰	۲۰۰۱	هلمولر و لاچال [۱۹]	کانال‌های زیرزمینی با خاک مرطوب			✓			✓
۱۱	۲۰۰۲	کاباشینکف و همکاران [۲۰]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش	✓	✓		✓	
۱۲	۲۰۰۳	پاپه و جانسنز [۲۱]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و طراحی سامانه	✓	✓		✓	
۱۳	۲۰۰۴	گسال و همکاران [۲۲]	کانال‌های زیرزمینی	پیش‌گرمایش		✓		✓	
۱۴	۲۰۰۵	لی و همکاران [۲۳]	کانال‌های زیرزمینی با خاک مرطوب	سرمایش		✓			✓
۱۵	۲۰۰۶	کومار و همکاران [۲۴]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓	✓			
۱۶	۲۰۰۸	کومار و همکاران [۲۵]				✓			✓
۱۷	۲۰۰۸	کوکومو و همکاران [۲۶]	کانال‌های زیرزمینی با خاک مرطوب	سرمایش	✓	✓		✓	

وز و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۱۴، در یک پژوهش تجربی، با اندازه‌گیری و سپس متوسط‌گیری از دمای ساعت‌به‌ساعت محیط در طول یک سال در شهر ویاماو در جنوب برزیل، از یک تابع سینوسی به عنوان دمای ورودی مبدل حرارتی هوا – زمین استفاده کردند. در این تحقیق اطلاعات کاملی در مورد دمای خاک، دمای محیط و دمای خروجی ارئه شده و بهترین زمان برای استفاده از این سامانه برای کاربرد گرمایشی و سرمایشی به ترتیب ماه‌های می و فوریه عنوان شده است.

بایسنیا و همکاران [۸] نیز در سال ۲۰۱۵، جهت تحلیل عملکرد سامانه از متوسط دمای ماهانه به عنوان دمای ورودی استفاده کردند. در این تحقیقات میزان صرفه‌جویی ارزی ایجاد شده در هزینه‌های سرمایشی و گرمایشی در کل سال ارزیابی شده است. علاوه بر آن میزان کاهش آلودگی هوا نیز به دلیل عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیقات ذکر شده است که این سامانه در تابستان به مراتب از کارایی بهتری برخوردار است.

بن هامو و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۵ با ترکیب بادگیر و مبدل های حرارتی هوا – زمین، سامانه سرمایش طبیعی جدیدی را پیشنهاد کردند. در این تحقیق عملکرد سیستم ترکیبی بادگیر و مبدل های حرارتی هوا - زمین با بادگیرهای سطوح خیس شونده مقایسه شده است و نشان داده می‌شود، درصورت استفاده از سامانه ترکیبی، عملکرد آن بهبود می‌یابد و دمای خروجی کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

بن‌هامو و همکاران [۴۲] همچنین در سال ۲۰۱۵ عملکرد حرارتی مبدل‌های زمینی در حالت گذرا و پایدار را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش قطر کانال، سرعت هوای ورودی و همچنین افزایش بازه زمانی کارکرد سامانه، اختلاف عملکرد سامانه در حالت گذرا و پایدار افزایش می‌یابد.

نیو و همکاران [۴۳] در سال ۲۰۱۵ با استفاده از یک مدل یک بعدی و پایدار و تحلیل ۶ پارامتر طراحی مبدل‌های زمینی، ظرفیت برودتی مبدل‌های زمینی را پیش‌بینی کردند.

	سال	محقق	سامانه	نوع کاربرد	هدف تحقیق		روش مورد بررسی		
					مدل سازی	تحلیل عملکرد	تجربی	تحلیلی	عددی
۱۸	۲۰۰۹	تیتلین و همکاران [۲۷]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓				✓
۱۹	۲۰۰۹	ژانگ و حقیقت [۲۸]			✓				✓
۲۰	۲۰۰۹	بانسال و همکاران [۲۹]		سرمایش و کاهش مصرف انرژی		✓			✓
۲۱	۲۰۰۹	چل و تیواری [۷]	کانال‌های زیرزمینی + سقف گنبدی	سرمایش	✓		✓		✓
۲۲	۲۰۱۰	معرفت و حقیقی [۲]	کانال‌های زیرزمینی + هواکش خورشیدی	سرمایش و تهویه طبیعی	✓	✓			✓
۲۳	۲۰۱۰	حیدری نژاد و همکاران [۳]	کانال‌های زیرزمینی (سیال آب) + سرمایش تبخیری مستقیم	سرمایش	✓				✓
۲۴	۲۰۱۱	دارکوا و همکاران [۳۰]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓		✓		✓
۲۵	۲۰۱۱	میوهلیسن [۳۱]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و طراحی سامانه		✓		✓	
۲۶	۲۰۱۲	خلجزاده و همکاران [۴]	کانال‌های زیرزمینی (سیال آب) + سرمایش تبخیری غیرمستقیم	سرمایش	✓				✓
۲۷	۲۰۱۲	فرر و همکاران [۳۲]	کانال‌های زیرزمینی با آرایش لایه‌های چندگانه		✓				✓
۲۸	۲۰۱۳	کلارا پرتی و همکاران [۳۳]	مروری بر تحقیقات کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و پیش‌گرمایش	✓	✓			
۲۹	۲۰۱۳	روت داسیلوا برام و همکاران [۳۴]	کانال‌های زیرزمینی		✓				✓
۳۰	۲۰۱۳	میسرا و همکاران [۳۵-۳۸]	کانال‌های زیرزمینی		✓	✓	✓		✓
۳۱	۲۰۱۴	اگزامن و همکاران [۳۹]	کانال‌های زیرزمینی+ عایق‌بندی کانال‌ها			✓			✓
۳۲	۲۰۱۴	لی و همکارن [۴۰]	کانال‌های زیرزمینی + هواکش خورشیدی	سرمایش و تهویه طبیعی	✓		✓		✓
۳۳	۲۰۱۴	وز و همکاران [۴۱]	کانال‌های زیرزمینی	سرمایش و پیش‌گرمایش		✓	✓		
۳۴	۲۰۱۵	بایسنیا و همکاران [۸]				✓			✓
۳۵	۲۰۱۵	بن هامو و همکاران [۵]	کانال‌های زیرزمینی + بادگیر	سرمایش	✓	✓			✓
۳۶	۲۰۱۵	بن هامو و همکاران [۴۲]	کانال‌های زیرزمینی			✓			✓
۳۷	۲۰۱۵	نیو و همکاران [۴۳]	کانال‌های زیرزمینی			✓	✓		✓
۳۸	۲۰۱۵	معرفت و همکاران [۶]	کانال‌های زیرزمینی + سرمایش تبخیری مستقیم		✓	✓			✓
۳۹	۲۰۱۵	نیو و همکاران [۴۴]	کانال‌های زیرزمینی با لحاظ کردن اشباع حرارتی خاک		✓	✓	✓		✓

جدول ۲ مهمترین تحقیقات انجام شده از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵

معرفت و حقیقی [۶] در سال ۲۰۱۵ پیشنهاد ترکیب کانال‌های زیرزمینی هوا و سیستم خنک‌کننده تبخیری را مطرح کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد این سامانه می‌تواند دمای هوای ورودی را تا حدود ۱۶°C کاهش دهد. علاوه بر آن راندمان سامانه ترکیبی نیز حدود ۴۵٪ بیشتر از راندمان سیستم خنک‌کننده تبخیری مستقیم می‌باشد.

نیو و همکاران [۴۴] همچنین در سال ۲۰۱۵ از طریق مدل دوبعدی و گذرا به صورت عددی با اعمال دمای ثابت در ورودی، به موضوع ریکاوری و اشباع حرارتی خاک در مبدل‌های حرارتی هوا - زمین پرداختند و میزان گرم شدن خاک اطراف کانال در زمان‌های مختلف پس از شروع به کار سامانه را بررسی کردند. در این تحقیق احیای خاک اطراف کانال در صورت

استفاده مقطعی از سامانه با اعمال دمای ورودی ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. اما مشکلی که در حل این سامانه دیده می‌شود این است که در مدل‌سازی سامانه، تنها خاک اطراف کانال مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و جهت بررسی هوای داخل کانال از همان روابط مورد استفاده در روش‌های مرسوم طراحی استفاده شده است. بنابراین در این مدل‌سازی نیز تاثیرات متقابل خاک اطراف کانال و هوای داخل آن به صورت هم‌زمان بررسی نشد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

با مقایسه و بررسی تحقیقات ذکر شده نتایج زیر حاصل شد:

- تا قبل از سال ۲۰۰۹ بیشتر تحقیقات کاربردی انجام شده بر روی کانال‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن خاک مرطوب انجام شده است، اما از سال ۲۰۰۹ به بعد تحقیقات بر روی این سامانه با اعمال تغییراتی بر روی آن و بکارگیری ایده‌های نوین دنبال شده است، به طوری که یا از طریق ترکیب این سامانه با دیگر سامانه‌های غیرفعال، مدل‌های جدیدی ارئه شده است، یا در نحوه استفاده از آن تغییرات بنیادینی اعمال شده است. به عنوان نمونه می‌توان به ایده تزریق آب به جای هوا در کانال‌ها، عایق بندی بخش‌های انتهای کانال و تغییر در نحوه آرایش کانال‌های زیرزمینی اشاره کرد.
- بررسی‌ها نشان داد که در اکثر مواردی که از این سامانه در سیستم‌های ترکیبی استفاده می‌شود، کارایی سامانه به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد.
- بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از این سامانه تنها به عنوان یک سیستم سرمایشی مد نظر قرار نگرفته است، بلکه می‌توان جهت پیش‌گرمایش هوای ورودی نیز از آن استفاده کرد. هرچند که در مجموع، سامانه در کاربرد سرمایشی از کارایی مناسب‌تری برخوردار است.
- با درنظر گرفتن جامعه آماری شامل مهمترین تحقیقات انجام گرفته در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ که بیشترین ارجاع را داشته اند، دیده می‌شود، روش عددی ۲۶ بار، روش تحلیلی ۹ بار و روش تجربی ۱۰ بار مورد استفاده قرار گرفته است. لذا بیشترین روش مورد استفاده جهت تحلیل این سامانه مربوط به روش عددی می‌باشد و برخلاف روش تحلیلی که اکثر پژوهش-های انجام شده به این روش به سال‌های قبل از ۲۰۰۹ برمی-گردد، اکثر تحقیقات انجام شده به روش عددی از سال ۲۰۰۹ به بعد انجام شده است. همچنین دیده می‌شود در اکثر تحقیقات تجربی داده‌های ورودی و شرایط آزمایش گزارش نشده است. به عنوان مثال در ۱۰ پژوهش مورد بررسی در ۸ مورد، از تحقیقات مستقل و غیرتکراری استفاده شده است و در بین این تحقیقات نیز تنها در ۳ مورد داده‌های ورودی و شرایط آزمایش با دقت گزارش شده است.
- بررسی تحقیقات در این خصوص نشان می‌دهد که در برخی از موارد طراحی و مدل‌سازی، دمای ورودی کانال ثابت و برابر حداکثر دما در طول شبانه‌روز (یا در طول یک ماه) انتخاب شده است. به عنوان نمونه نیو و همکاران [۴۴] در سال ۲۰۱۵ جهت مدل‌سازی دوبعدی و گذرای مبدل‌های حرارتی هوا – زمین، دمای ورودی کانال را ثابت در نظر گرفتند. همچنین بایسنیا و همکاران [۸] نیز در همین سال، جهت تحلیل عملکرد سامانه از متوسط دمای ماهانه به عنوان دمای ورودی استفاده کردند. این در حالی است که در تحقیقات معرفت و همکاران [۶]، جهت ارزیابی عملکرد سیستم ترکیبی کانال‌های زیرزمینی هوا و خنک‌کننده تبخیری مستقیم، از دمای حباب خشک گرم‌ترین روز تابستان به عنوان دمای ورودی به سامانه استفاده شده است. در مواردی نیز دیده می‌شود که جهت اعمال دمای ورودی از دمای پریودیک استفاده شده است که در این مورد می‌توان به مطالعات هولمولار [۴۵] در سال ۲۰۰۳ اشاره کرد. در نمونه‌ای دیگر دیده می‌شود که وز و همکاران [۴۱] در سال ۲۰۱۴، در یک پژوهش تجربی، با متوسط‌گیری از دمای ساعت‌به‌ساعت محیط در طول یک سال، از یک تابع سینوسی به عنوان دمای ورودی مبدل حرارتی هوا – زمین استفاده کردند. در موارد متعددی نیز دیده می‌شود که از دمای ساعت‌به‌ساعت محیط (دمای واقعی) به عنوان دمای ورودی به کانال زیرزمینی استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات لی و همکاران [۴۰] در سال ۲۰۱۴ اشاره نمود که جهت بررسی سامانه ترکیبی مبدل حرارتی هوا - زمین و هواکش خورشیدی، دمای ساعت‌به‌ساعت محیط را به عنوان دمای ورودی به سامانه در نظر گرفتند. اکنون این سوال مطرح می‌شود که در نظر گرفتن پروفیل دمای ثابت (مطابق با بحرانی‌ترین دما در گرم‌ترین ماه سال) و دمای پریودیک (مطابق با متوسط دمای حداقل و حداکثر مطلق در طی گرم‌ترین ماه سال) به عنوان دمای ورودی، تا چه اندازه در محاسبه طول مورد نیاز کانال خطا ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر در مواردی که استفاده از پروفیل دمای ساعت‌به‌ساعت محیط بیرون به عنوان دمای ورودی به مبدل حرارتی هوا – زمین، امکان‌پذیر نباشد، در صورت استفاده از دمای ثابت و همچنین دمای پریودیک، طول کانال چند درصد کمتر یا بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود که این موضوع در این تحقیقات مورد بررسی قرار نگرفته است.
- اما مهمترین نکته‌ای که در بررسی این تحقیقات نمایان می‌شود این است که در بسیاری از این پژوهش‌ها گرم شدن خاک اطراف کانال در نظر گرفته نشده است و دمای دیواره کانال که با خاک اطراف آن در تماس می‌باشد ثابت فرض شده است. به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات تزافریس[۱۲] در سال ۱۹۹۲، چنگ و همکاران [۱۸] در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد. نکته قابل توجه این است که در برخی از روش‌های مرسوم طراحی این سامانه نیز اشباع حرارتی خاک لحاظ نشده است که در این مورد نیز می‌توان به تحقیقات پاپه و جانسنز [۲۱] در سال ۲۰۰۳ و میوهلیسن [۳۱] در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد. از طرفی دیده می‌شود در برخی از این تحقیقات با در نظر گرفتن شرایط پایا برای حل مسئله، افت عملکرد سامانه که با گذشت زمان رخ می‌دهد در محاسبات اعمال نشده و کلیه تحلیل‌ها و نتایج بدست آمده، مربوط به اولین ساعت‌های شروع به کار سامانه می‌باشد که خاک اطراف کانال گرم نشده و سامانه از ماکزیمم کارایی خود برخوردار می‌باشد. همچنین در معدود تحقیقاتی که

اشباع حرارتی خاک لحاظ شده و سامانه در شرایط گذرا مورد بررسی قرار گرفته است، به دلیل بررسی عملکرد سامانه در بازه زمانی کوتاه مدت، میزان دقیق افت عملکرد سامانه و مدت زمانی که طول می‌کشد تا سامانه به حالت پایا برسد مورد بررسی قرار نگرفته است. به عنوان نمونه‌ای از این مورد، می‌توان به تحقیقات نیو و همکاران [۴۴] در سال ۲۰۱۵ و میسرا، بانسال و همکاران [۳۵-۳۸] در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد.

۶- مراجع

[۱] T. S. Bisoniya, A. Kumar, P. Baredar, Study on calculation models of earth-air heat exchanger systems, *Journal of Energy*, vol. ۲۰۱٤, ۲۰۱٤.

[۲] M. Maerefat, A. P. Haghighi, Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney, *Renewable Energy*, vol. ٤٥, pp. ۲٤۲۱-۲٤۲۹, ۲۰۱۰.

[۳] G. Heidarinejad, V. Khalajzadeh, S. Delfani, Performance analysis of a ground-assisted direct evaporative cooling air conditioner, *Building and Environment*, vol. ۳٥, pp. ۲۳۱٦-۲۳۲٤, ۲۰۱۰.

[٤] V. Khalajzadeh, M. Farmahini-Farahani۱, G. Heidarinejad, A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler, *Energy and Buildings*, vol. ٤۹, pp. ٦۰٤-٦۱۰, ۲۰۱۲.

[٥] M. Benhammou, B. Draoui, M. Zerrouki, Y. Marif, Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate, *Energy Conversion and Management*, vol. ۹۱, pp. ۱-۱۱, ۲۰۱٥.

[٦] M. Maerefat, S. Ahmadi, A. Haghighi Poshtiri, Investigation and performance analysis of hybrid cooling system of air underground channel and direct evaporative cooler, *Modares Mechanical Engineering*, vol. ۱٥, No. ٥, pp. ۱۳۷-۱٤٤, ۲۰۱٥ (In Persian).

[۷] A. Chel, G. N. Tiwari, Performance evaluation and life cycle cost analysis of earth-to-air heat exchanger integrated with adobe building for new dehli composite climate, *Energy and Buildings*, vol. ٤۱, pp. ٥٦-٦٦, ۲۰۰۹.

[۸] T. S. Bisoniya, A. Kumar, P. Baredar, Energy metrics of earth–air heat exchanger system for hot and dry climatic conditions of India, *Energy and Buildings*, vol. ۸٦, pp. ۲۱٤-۲۲۱, ۲۰۱٥.

[۹] A. Haghighi Poshtiri, *Numerical modeling and thermal comfort analysis of passive heating and cooling systems, solar chimney and earth-to-air heat exchanger*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, ۲۰۰۹. (In Persian)

[۱۰] D. Y. Goswami, A. S. Dhaliwal, Heat transfer analysis in environmental control using an underground air tunnel, *Journal of solar Energy Engineering*, vol. ٥, pp. ۱۰۷-۱٤۱, ۱۹۸٥

[۱۱] A. Trombe, M. Pettit, B. Bourret, Air Cooling by earth tube heat exchanger: experimental approach, *Renewable Energy*, vol. ۱, No ٥/٦, pp. ٦۹۹-۷۰۷, ۱۹۹۱.

[۱۲] A. Tzaferis, D. Liparakis, Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models predict the performance of earth-to-Air heat exchanger, *Energy and Buildings*, vol. ۱۸, pp. ۳٥-٤۳, ۱۹۹۲.

[۱۳] C. P. Jacovides, G. Mihalakakou, An underground pipe system as an energy source for cooling / heating purposes, *Renewable Energy*, vol. ٦, No. ٦, pp. ۸۹۳-۹۰۰, ۱۹۹٥.

[۱٤] M. Santamouris, G. Mihalakakou, C. A. Balaras, J. O. Lewis, M. Vallindrs and A. Argiriou, Energy conservation in greenhouse with buried pipes, *Energy*, vol. ۲۱, No. ٥, pp. ۳٥۳-۳٦۰, ۱۹۹٦.

[۱٥] M. Krarti, J. F. Kreider, Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, *Energy conversion and management*, vol. ۳۷, No. ۱۰, pp. ۱٥٦۱-۱٥۷٤, ۱۹۹٦.

[۱٦] M. Inalli, Design parameters for a solar heating system with an underground cylindrical tank, *Energy*, vol. ۲۳, No. ۱۲, pp. ۱۰۱٥-۱۰۲۷, ۱۹۹۸.

[۱۷] G. N. Tiwari, R. F. Sutar, H. N. Singh and R. K. Goyal, Performance studies of earth air tunnel cum greenhouse technology, *Energy Conversion and Management*, vol. ۳۹, No. ۱٤, pp. ۱٤۹۷-۱٥۰۲, ۱۹۹۸.

[۱۸] M. Chung, P. S. Jung, R. H. Rangl, Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ٤۲, pp. ۳۷۷۱-۳۷۸۹, ۱۹۹۹.

[۱۹] P. Hollmuller, B. Lachal, Cooling and perheating with buried pipe systems: Monitoring, simulation and economic aspects, *Energy and Buildings*, vol. ۳۳, pp. ٥۰۹-٥۱۸, ۲۰۰۱.

[۲۰] V. P. Kabashinkov, L. N. Danilevskii, V. P. Nekrasov, I. P. Vityaz, Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ٤٥, pp. ۲٤۰۷-۲٤۱۸, ۲۰۰۲.

[۲۱] M. D. Paepe, A. Janssens, Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, vol. ۳٥, pp. ۳۸۹-۳۹۷, ۲۰۰۳.

[۲۲] M. K. Gosal, G. N. Tiwari, N. S. Srivastava, Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation, *Energy and Buildings*, vol. ۳٦, pp. ۲۱۹-۲۲۷, ۲۰۰٤.

[۲۳] X. Li, J. Zhao, Q. Zhau, Inner heat source model with heat and moisture transfer in soil around the underground heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, vol. ۲٥, pp. ۱٥٦٥-۱٥۷۷, ۲۰۰٥.

[۲٤] R. Kumar, S. C. Kaushik, S. N. Garg, Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network, *Renewable Energy*, vol. ۳٤, pp. ۱۱۳۹-۱۱٥٥, ۲۰۰٦.

[۲٥] R. Kumar, A. R. Sinha, B. K. Singh, U. Modhukalya, A design optimization tool of earth-to-air heat exchanger using a genetic algorithm, *Renewable Energy*, vol. ۳۳, pp. ۲۲۸۲-۲۲۸۸, ۲۰۰۸.

[۲٦] M. Cucumo, S. Cucumo, L. Montoro, A. Vulcano, A One-dimensional transient analytical model for earth-to-air heat exchangers, taking into account condensation phenomena and thermal perturbation from the upper free surface as well as around the buried pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ٥۱, pp. ٥۰٦-٥۱٦, ۲۰۰۸.

[۲۷] P. Tittelein, G. Achard, E. Wurts, Modelling earth-to-air heat exchanger behaviour with convolutive response factors method, *Applied Energy*, vol.۸٦, pp. ۱٦۸۳-۱٦۹۱, ۲۰۰۹.

[۲۸] J. Zhang, F. Haghighat, Convective heat transfer prediction in large rectangular cross-sectional area earth-to-air heat exchangers, *Building and environment*, vol. ٤٤, pp. ۱۸۹۲-۱۸۹۸, ۲۰۰۹.

[۲۹] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal, J. Mathur, Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating, *Energy and Buildings*, vol. ٤۱, pp. ۱۱٥۱-۱۱٥٤, ۲۰۰۹.

[۳۰] J. Darkwa, G. Kokogiannakis, C. L. Magadzire, and K. Yuan, Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system, *Energy and Buildings*, vol. ٤۳, pp. ۷۲۸–۷۳٦, ۲۰۱۱.

[۳۱] R. T. Muehleisen, Simple design tools for earth-air heat exchangers, *Decision and Information Sciences*, Argonne National Lab, Argonne, IL, USA, ۲۰۱۱

[۳۲] A. D. Freire, J. L. Alexandre, V. B. Silva, N. D. Couto, and A. Rouboa, Compact buried pipes system analysis for indoor air conditioning, *Applied Thermal Engineering*, vol. ٥۱, pp. ۱۱۲٤–۱۱۳٤, ۲۰۱۳.

[۳۳] C. Peretti, A. Zarrella, M. D. Carli, R. Zecchin,The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ۲۸, pp ۱۰۷–۱۱٦, ۲۰۱۳.

[۳٤] R. D. Bruma, J. Vazb, L. A. Rochac, A new computational modeling to predict the behavior of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, vol. ٦٤, pp. ۳۹٥–٤۰۲, ۲۰۱۳.

[۳٥] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, T. Aseri, Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer, *Energy and Buildings*, Vol. ٥۸, pp. ۱۰۳-۱۱۰, ۲۰۱۳.

[۳٦] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal, J. Mathur, 'Derating Factor' new concept for evaluating thermal performance of earth air tunnel heat exchanger: A transient CFD analysis, *Applied Energy*, Vol. ۱۰۲, pp. ٤۱۸-٤۲٦, ۲۰۱۳.

[۳۷] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, T. K. Aseri, CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth

Air Tunnel Heat Exchanger, *Applied Energy*, Vol. ۱۰۳, pp. ۲٦٦-۲۷۷, ۲۰۱۳.

[۳۸] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, T. Aseri, Transient analysis based determination of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger in winter, *Energy and Buildings*, Vol. ٥٨, pp. ۷٦-۸٥, ۲۰۱۳.

[۳۹]J. Xamána, I. Hernández-Pérez, J. Arce, G. Álvarez, L. Ramírez-Dávila, F. Noh-Pat, Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation, *Energy and Buildings*, vol. ۸٥, pp. ۳٥٦-۳٦۱, ۲۰۱٤.

[٤۰]H. Li, Y. Yu , F. Niu , M. Shafik , B. Chen, J. A. Herrera-Castillo, Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney, *Renewable Energy*, vol. ٦۲, pp. ٤٦۸-٤۷۷, ۲۰۱٤.

[٤۱] J. Vaza, M. A. Sattler, R. S. Brum, E. D. Santosa, L. A. Isoldi, An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE), *Energy and Buildings*, Vol.۷۲, pp. ۱۲۲-۱۳۱, ۲۰۱٤.

[٤۲]M. Benhammou, B. Draoui, Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,vol. ٤٤, pp. ۳٤۸-۳٥٥, ۲۰۱٥.

[٤۳] F. Niu, Y. Yu, D. Yu, H. Li, Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger, *Applied Energy*, Vol. ۱۳۷, pp.۲۱۱-۲۲۱, ۲۰۱٥.

[٤٤]F. Niu, Y. Yu, D. Yu, H. Li, Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies, *Applied Thermal Engineering*, vol. ۷۷, pp. ۹۰-۱۰۰, ۲۰۱٥

[٤٥]P. Hollmuller, Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. ٤٦, pp. ٤۳۰۳-٤۳۱۷, ۲۰۰۳.