



The University of Tehran Press

Earth to Air Heat Exchanger systems: A Comprehensive Review of Design and Performance with Case Applications in Iranian Greenhouses

Davar Ebrahimi^{1*} | Shahriar Bozorgmehri²

1. Corresponding Author, Faculty member, Renewable Energy Department, Energy and Environment Research Center, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. Email: debrahimi@nri.ac.ir

2. Faculty member, Renewable Energy Department, Energy and Environment Research Center, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. Email: sbozorgmehri@nri.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 18 February 2025
Revised 19 March 2025
Accepted 25 April 2025
Published Online 23 August 2025

Keywords:
Earth-to-Air Heat Exchanger,
Greenhouse energy efficiency.

ABSTRACT

The use of Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHX) has increasingly been recognized as an effective and innovative approach for providing heating, cooling, and ventilation in various built environments. This study evaluates the performance of these systems through an analysis of existing installations in different countries and assesses their operational outcomes. Key parameters influencing the efficiency of EAHX systems include pipe material, burial depth, pipe length and diameter, surrounding soil type and moisture content, soil thermal conductivity, and airflow rate. Optimal selection and design of these parameters significantly enhance system efficiency and optimize heat exchange between air and the ground. The findings of this research demonstrate that the proper implementation of EAHX systems can lead to substantial energy savings, improved indoor thermal stability, and reduced environmental pollutants. Moreover, the performance of these systems has been examined in several greenhouses across the country, where their positive effects on reducing final production costs and increasing energy efficiency have been confirmed. In some greenhouse applications, a temperature differential of up to 10°C resulted in as much as 70% energy savings, along with improvements in both the quantity and quality of the crops. This has encouraged private sector investment in this field. Given the relatively low initial cost, minimal maintenance requirements, and high efficiency under proper design conditions, EAHX systems can serve as a sustainable and cost-effective solution for greenhouse energy supply in various regions of Iran.

Cite this article: Ebrahimi, D. & Bozorgmehri, Sh. (2025). Earth to Air Heat Exchanger systems: A Comprehensive Review of Design and Performance with Case Applications in Iranian Greenhouses. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (4), 405-425. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393932.1136>



© Davar Ebrahimi, Shahriar Bozorgmehri
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.393932.1136>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

The growing global demand for energy, along with environmental concerns and the need for sustainable development, has led to increased interest in alternative and renewable energy solutions. Among these, Earth-to-Air Heat Exchangers (EAHX) have emerged as a passive and energy-efficient method for providing heating, cooling, and ventilation by utilizing the relatively constant temperature of the subsurface soil. These systems are particularly suitable for regions with significant temperature fluctuations, offering a reliable solution with minimal environmental impact. EAHX systems can be effectively applied in various sectors, including residential buildings, industrial facilities, and agricultural greenhouses. Their simplicity in design, low operational costs, and compatibility with local climatic and geological conditions make them an attractive choice for improving energy efficiency. This study investigates the key design and environmental parameters influencing the

performance of EAHX systems and evaluates their effectiveness in real-world applications, with a particular focus on greenhouse operations in Iran.

Discussion

The results of this study highlight the significant potential of Earth-to-Air Heat Exchanger systems as a passive and energy-efficient solution for heating, cooling, and ventilation. Various parameters including pipe material, burial depth, pipe length and diameter, soil type and moisture, and airflow rate were shown to directly influence the system's thermal performance. Among these, soil properties and airflow velocity had the most significant effect on heat transfer efficiency. PVC pipes, due to their low cost and adequate thermal conductivity, were frequently used in practical applications. In Iran, the application of EAHX systems in greenhouse environments demonstrated notable success. Field data showed considerable reductions in energy consumption and improvements in indoor temperature stability, particularly during seasonal extremes. Moreover, the decrease in energy-related costs contributed to lowering the final production cost, encouraging greater private sector investment in such technologies. Despite their advantages, proper system design remains essential for optimal performance, especially when adapting to specific climatic and geological conditions. The findings support the feasibility of expanding EAHX systems in various regions of Iran as part of a broader sustainable energy strategy. Future studies should focus on long-term performance monitoring and integrating these systems with other renewable technologies to maximize energy efficiency and environmental benefits.

Conclusion

Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHX) systems offer a promising, low-cost, and energy-efficient alternative for thermal comfort in various applications, especially in agricultural greenhouses. This study has demonstrated that appropriate design considerations such as pipe depth, length, material, soil type, and airflow rate play a vital role in the overall performance of the system. The evaluations of Iranian greenhouses with these systems showed significant temperature moderation throughout the year, leading to reduced reliance on conventional heating and cooling systems and a noticeable decrease in energy consumption. The economic benefits, including lower production costs and higher energy efficiency, make EAHX systems an attractive option for private sector adoption. Their scalability and adaptability to local environmental conditions further enhance their practicality across diverse regions in Iran. To maximize the potential of these systems, future work should focus on optimizing design standards based on regional soil and climate data, promoting integration with other renewable energy sources, and developing government support mechanisms to encourage widespread adoption. EAHX technology can play a key role in national strategies for sustainable development and energy independence.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

سیستم‌های دالان زمین گرمایی: مروری جامع بر طراحی، عملکرد و کاربردهای موردی در گلخانه‌های ایران

داور ابراهیمی^{۱*} | شهریار بزرگمهری^۲

۱. نویسنده مسئول، عضو هیئت علمی گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو. رایانامه: debrahimi@nri.ac.ir
۲. عضو هیئت علمی گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، پژوهشگاه نیرو. رایانامه: sbozorgmehri@nri.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

کلیدواژه:

دالان زمین گرمایی،
مبدل حرارتی زمین به هوا،
بهره‌وری انرژی در گلخانه.

استفاده از دالان‌های زمین گرمایی به عنوان یکی از روش‌های کارآمد در تأمین گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، عملکرد این سیستم‌ها از طریق بررسی نمونه‌های اجرایی در کشورهای مختلف و تحلیل نتایج، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر این اساس، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی این سیستم‌ها شامل جنس لوله‌ها، عمق دفن، طول و قطر کانال‌ها، نوع و رطوبت خاک اطراف، ضریب هدایت حرارتی خاک و سرعت جریان هوا هستند. انتخاب بهینه هر یک از این پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود انتقال حرارت بین هوا و زمین و افزایش بازدهی سیستم دارد. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد بهره‌برداری اصولی از دالان‌های زمین گرمایی به صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی، بهبود پایداری دمایی فضا و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود. همچنین، عملکرد این سیستم‌ها در تعدادی از گلخانه‌های کشور مورد بررسی قرار گرفته و اثرات مثبت آن در کاهش هزینه نهایی تولید محصول و افزایش بهره‌وری انرژی به اثبات رسیده است. در برخی از پروژه‌های اجرا شده در گلخانه‌های کشور، با تغییر ۱۰ درجه‌ای دما باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی تا ۷۰ درصد، و افزایش کمیت و کیفیت محصول شده‌اند. این موضوع موجب تمایل بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در این حوزه شده است. با توجه به هزینه اولیه نسبتاً پایین، نیاز اندک به تعمیر و نگهداری و بازده مناسب در شرایط طراحی مطلوب، دالان‌های زمین گرمایی به عنوان راهکاری پایدار و اقتصادی برای تأمین انرژی گلخانه‌ها در مناطق مختلف ایران مطرح است.

استناد: ابراهیمی، داور و بزرگمهری، شهریار (۱۴۰۴). سیستم‌های دالان زمین گرمایی: مروری جامع بر طراحی، عملکرد و کاربردهای موردی در گلخانه‌های ایران. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۴) ۴۰۵-۴۲۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ses.2025.393932.1136>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© داور ابراهیمی، شهریار بزرگمهری

DOI: <https://doi.org/10.22059/ses.2025.393932.1136>



۱. مقدمه

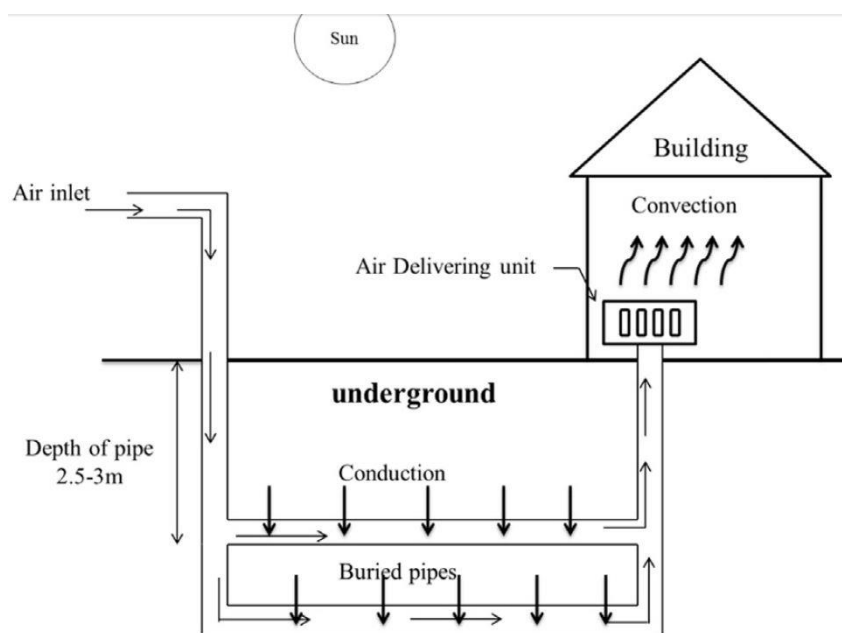
امروزه، با افزایش قابل توجه جمعیت و رشد فعالیت‌های اقتصادی در دنیا، نگرانی‌ها در خصوص امنیت تأمین انرژی افزایش پیدا کرده است و پژوهشگران این حوزه، روی به سیستم‌هایی آورده‌اند که انرژی را به صورت پایدار، تولید، منتقل و آماده مصرف می‌کنند. مقدار انرژی مورد نیاز جهت سرمایش و گرمایش واحدهای مختلف نیز روزبه‌روز بیشتر می‌شود و افزایش بهره‌برداری از سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع، همراه با مشکلاتی همچون نیاز به توان الکتریکی بالا و افزایش مقدار اوج بار وارد بر شبکه می‌شود. تأمین این انرژی علاوه بر هزینه بالا، نتایجی همچون آسیب به محیط زیست و کاهش کیفیت هوای داخل فضاها را به همراه خواهد شد. بنابراین، استفاده از سیستم‌هایی که از منابع پایدار، انرژی مورد نیاز را تأمین می‌کنند، مورد توجه قرار گرفته است و به عنوان راه حلی برای بحران‌های کنونی شناخته می‌شوند. یکی از سیستم‌هایی که در بسیاری از کشورها جهت تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز برای تأمین گرمایش و سرمایش فضاهای مسکونی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مبدل‌های حرارتی زمین به هوا^۱ یا دالان‌های زمین‌گرمایی است. طبق تعریف، سیستم‌هایی که سیالی را جهت سرمایش یا گرمایش فضاهای واحدهای مختلف، توسط لوله‌های مدفون در زمین به جریان درمی‌آورند، مبدل حرارتی با منبع زمینی می‌نامند. به منظور سهولت کاربرد، نام فارسی دالان زمین‌گرمایی برای این سیستم‌ها در نظر گرفته شد. این سیستم‌ها با استفاده از ثابت ماندن دمای بخش‌های زیرسطحی زمین، جهت تأمین گرمایش و سرمایش فضاها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بهره‌برداری از این سیستم‌ها به عنوان یک روش کم‌هزینه و قابل اجرا در کوتاه‌مدت مطرح است که باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی برخی واحدها و تأمین کامل انرژی برای برخی از فضاها می‌شود. در کشور ما این سیستم‌ها در حال حاضر در فقط در برخی گلخانه‌ها توسط بخش خصوصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. محققان زیادی در نقاط مختلف دنیا دالان‌های زمین‌گرمایی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. هر منطقه و سایتی که مورد بررسی قرار گرفته است شرایط آب و هوایی خاصی دارد که روی عملکرد این سیستم‌ها تأثیرگذار بوده است. نتایج مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد دالان‌های زمین‌گرمایی هم در آب و هوای گرم و هم در آب و هوای سرد می‌توانند به منظور به عنوان یک سیستم کمکی یا اصلی مورد استفاده قرار گیرند.

در این مطالعه سعی بر آن شده است که با انجام مطالعات تطبیقی در بسیاری از کشورهای دنیا، اطلاعات دقیقی در خصوص عملکرد این سیستم‌ها به دست آید. همچنین، با بررسی تعداد زیادی از پروژه‌های اجراشده دالان زمین‌گرمایی در گلخانه‌های استان‌های مختلف کشور، نقش آن‌ها در افزایش راندمان تولید محصول و میزان صرفه‌جویی انرژی مشخص شد.

۲. عملکرد دالان زمین‌گرمایی و آمارهای مربوط به آن

عملکرد این سیستم‌ها مشابه پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی است با این تفاوت که در دالان زمین‌گرمایی، سیال کاری، هوا است، ولی سیستم پمپ حرارتی با منبع زمینی، از سیال کاری مایع متشکل از آب و ضدیخ یا مبرد بهره می‌برد. همچنین، عمق نصب دالان‌های زمین‌گرمایی معمولاً در بازه ۰/۵ تا ۵ متر قرار می‌گیرد، ولی در سیستم‌های پمپ حرارتی، عموماً مبدل‌های حرارتی عمودی در اعماق ۲۰ تا ۲۰۰ متری مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارایی دالان زمین‌گرمایی، رابطه مستقیمی با عمق دفن مبدل‌ها دارد و با افزایش عمق، سیستم بازدهی بیشتری دارد، اما این امر سبب افزایش هزینه‌ها نیز می‌شود [۲-۷]. طرح نمونه یک دالان زمین‌گرمایی برای تأمین انرژی یک ساختمان در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است.

این سیستم‌ها قابل استفاده به همراه سایر سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع نیز هستند که برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۹]. اخیراً از دالان‌های زمین‌گرمایی در حوزه‌های صنعتی نیز استفاده شده که در جدول ۱ به نتایج شاخص‌ترین پروژه‌ها اشاره شده است.



شکل ۱. طرح نمونه یک سیستم دالان زمین‌گرمایی جهت تأمین انرژی یک ساختمان [۸]

جدول ۱. معرفی برخی از پروژه‌های اجرایی دالان زمین‌گرمایی در کشورهای مختلف

مرجع	نکات کاربردی	مشخصات سیستم نصب‌شده					کشور محل نصب	نوع کاربرد
		مساحت (m ²)	عمق دفن لوله (m)	طول لوله (m)	قطر لوله (m)	تعداد لوله‌ها		
[۱۰]	کاهش ۲۸/۸ درصد مصرف انرژی ساختمان با دبی ۱۶۸۰۰ m ³ در ساعت	۴۲۴۰	دو لایه ۲٫۵ و ۴	۴۰	۰٫۵	۹	ژاپن	گرمایشی / سرمایشی ساختمان
[۱۱]	افزایش ۹ °C دما در زمستان و کاهش ۱۴ °C دما در تابستان		۱٫۵	۴۲	۰٫۲۵	۳۰	اسکاتلند	گرمایشی / سرمایشی کالج
[۱۲]	افزایش ۶/۵ °C دما در زمستان و کاهش ۳ °C دما در تابستان	۵۳	۱٫۵	۷۸	۰٫۰۶	۱	هندوستان	گرمایشی / سرمایشی خانه
[۱۳]	افزایش و کاهش دما در بازه ۵-۱۵ °C در فصول مختلف	۹۴	۱٫۵	۷۸	۰٫۲۵	۱۶	انگلستان	گرمایشی / سرمایشی مدرسه
[۱۴]	تأمین سرمایش با ظرفیت ۵۱۲ kwh و گرمایش با ظرفیت ۲۶۹ kwh	۱۶	۴	۸۰		۱	هندوستان	گرمایشی / سرمایشی بخشی از بیمارستان
[۱۵]	تأمین سرمایش با ظرفیت سالانه ۲۰۵۰۰ kwh و گرمایش با ظرفیت سالانه ۱۰۷۰۰ kwh با دبی ۲۷۰۰ (m ³ در ساعت)	۳۲۵۰	۱٫۵	۳۵	۰٫۲	۲۰	لهستان	گرمایشی / سرمایشی سوپر مارکت
[۱۶]	تأمین هوای خنک‌شده با دبی ۵/۷۶ (m ³ در ثانیه)	۱۲۰	۴	۶۰		۲	هندوستان	سرمایشی خانه باغ
[۱۷]	تأمین هوای خنک‌شده با دبی ۲ (m ³ در ثانیه) و توان ۱۴ kw در ماه‌های جولای و آگوست	۳۸۰	۲		۰٫۲	۱۱	فرانسه	سرمایش اتاقی پرستاری

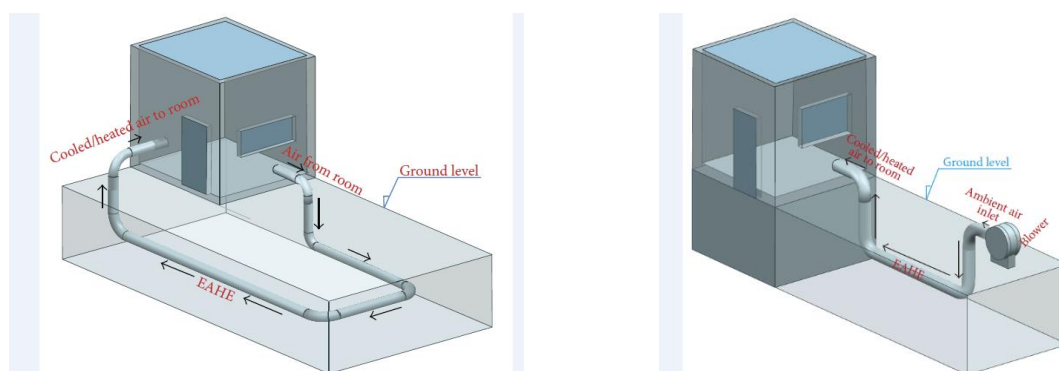
ادامه جدول ۱.

مرجع	نکات کاربردی	مشخصات سیستم نصب‌شده				کشور محل نصب	نوع کاربرد
		مساحت (m^2)	عمق دفن لوله (m)	طول لوله (m)	قطر لوله (m)	تعداد لوله‌ها	
[۱۸]	ثابت نگه داشتن دمای میانگین $31^{\circ}C$ در شرایط رطوبتی 52% در فصل تابستان	۲۰۶	۴	۷۶٫۵		۲	سرمایشی خانه مزرعه
[۱۹]	کاهش $15^{\circ}C$ دما با دبی هوا $169/9 m^3$ در دقیقه)			۷۰	۰٫۷	۴	سرمایشی مسکونی
[۲۰]	کاهش 86% درصد و 62% درصد اوج بار سرمایشی و گرمایشی		۳	۵۰	۰٫۴	۶	تهویه مطبوع آزمایشگاه
[۲۱]	کاهش مصرف انرژی $60-70\%$ درصد با دبی $509/7 m^3$ در دقیقه)		۵	۱۸	۰٫۲	۲۰	تهویه مطبوع خوابگاه
[۲۲]	افزایش $9^{\circ}C$ دما در زمستان و کاهش $14^{\circ}C$ دما در تابستان	۴۵۰	دو لایه $1/5$ و $1/8$	۱۸	۰٫۲	۲۰	تهویه مطبوع سالن مدرسه
[۲۳]	ثابت نگه داشتن دمای میانگین $31^{\circ}C$ در شرایط دمای $-0/8^{\circ}C$ در فصل زمستان	۱۵۰	۲	۲۰	۰٫۲	۲۰	گرمایش گلخانه
[۲۴]	افزایش $7-8^{\circ}C$ دما در شب‌های زمستانی	۲۴	۱	۳۹	۰٫۰۸	۱	سرمایش گلخانه
[۲۵]	افزایش $2/7$ برابری رشد محصولات	۱۲۰	دو لایه ۲ و ۳	۲۳	۰٫۲	۸	سرمایش گلخانه
[۲۶]	دبی $0/91 m^3$ در ثانیه)	۸۰	دو لایه $0/45$ و $0/75$	۱۲	۰٫۱	۲۶	سرمایش گلخانه
[۲۷]	تأمین شرایط بهینه سرمایشی	۴۸/۵		۴۷	۰٫۵۶	۱	سرمایش گلخانه
[۲۸]	افزایش $8^{\circ}C$ دما در زمستان و کاهش $10^{\circ}C$ دما در تابستان با دبی $44/4 m^3$ در دقیقه)		۲	۲۷	۰٫۲	۲	گرمایشی/ سرمایشی باغ وحش
[۲۹]	کاهش دما از $55^{\circ}C$ به $42^{\circ}C$ و افزایش بازدهی $22/98\%$ درصد و توان تولید برق $18/9$ درصد	۱٫۶۵	۱	۱٫۲	۰٫۰۱۹	۱۲	خنک سازی پنل‌های خورشیدی

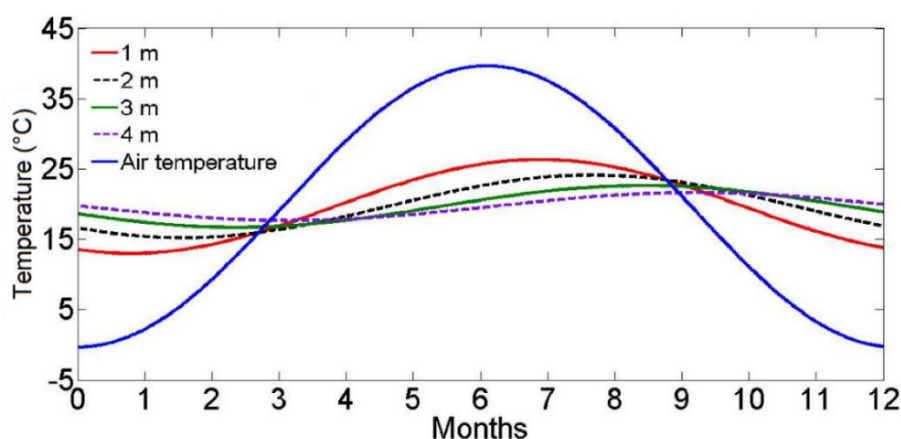
در یک تقسیم‌بندی کلی، روش اجرای این سیستم‌ها به دو صورت سیستم‌های بسته و باز تقسیم می‌شود (شکل ۲). در سیستم‌های باز می‌توان هوای تازه برای تهویه فضاها را نیز فراهم کرد. این روش در ساختمان‌های مسکونی کاربرد بیشتری دارد که معمولاً نحوه لوله‌گذاری آن‌ها به صورت عمودی صورت می‌گیرد. در مجموع، می‌توان گفت که طراحی یک سیستم دالان زمین‌گرمایی به نوع پروژه، محل احداث آن، فضای در اختیار، دسترسی به منابع آب و انرژی و سایر عوامل محیطی بستگی دارد. در کاربردهای مربوط به گلخانه‌ها به دلیل وجود فضای در دسترس، معمولاً شرایط مناسب‌تری برای طراحی وجود دارد و با محدودیت‌های کمتری مواجهیم.

عملکرد این سیستم‌های ساده استفاده از ثابت ماندن دمای زمین است [۳۰]. دمای زمین معمولاً کمتر از دمای هوا طی تابستان و همچنین، بیشتر از دمای هوا در فصل زمستان است. در نتیجه، می‌توان از این قابلیت زمین برای تأمین گرمایش و

سرمایش فضاهاى مختلف استفاده کرد [۳۱]. از آنجا که انتقال حرارت توسط خاک پایین بوده و ظرفیت حرارتی^۱ آن بالا است، لذا دمای خاک بسیار آهسته تغییر می‌کند. این ویژگی بستگی به عمق لوله‌گذاری نیز دارد و باعث می‌شود که خاک یا زمین بخشی از حرارت خود را در فصل‌های مختلف منتقل کند (حرارت جذب‌شده در فصل تابستان را در زمستان از دست بدهد). درخور یادآوری است که ویژگی زمین برای مناطق مختلف تفاوت اندکی دارد که بستگی به عواملی همچون جنس خاک و سنگ‌ها، میزان اشباع‌شدگی و شرایط آب و هوایی و اقلیم مکان مورد نظر دارد [۳۲]. در بسیاری از مناطق منحنی مربوط به تغییرات دما نسبت به عمق، محاسبه شده است. به عنوان مثال، در شکل ۳ تغییرات دمای هوا و خاک (در اعماق مختلف) در شهر لاس وگاس امریکا نشان داده شده است. هرچه به سمت اعماق بیشتری از زمین می‌رویم، دامنه تغییرات حرارت کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، دما در عمق یک متری بین ۱۳ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد طی سال تغییر می‌کند. در حالی که در عمق ۴ متری منطقه مورد مطالعه این تغییر دما بین ۱۸ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد، طی ماه‌های مختلف سال اندازه‌گیری شده است.



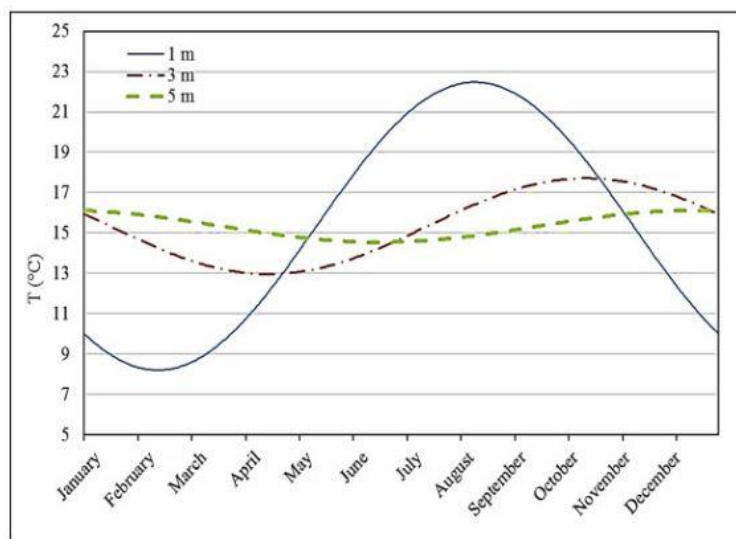
شکل ۲. انواع دالان زمین‌گرمایی: سیستم دالان زمین‌گرمایی باز (سمت راست)، سیستم دالان زمین‌گرمایی بسته (سمت چپ)



شکل ۳. تغییرات ماهیانه دما در اعماق مختلف خاک در شهر لاس وگاس امریکا [۳۳]

در بسیاری از کشورهای دنیا، تمامی اطلاعات مربوط به حفاری هر گونه چاهی، از جمله عمق، دما، دبی، قطر حفاری، جنس سنگ‌های دیواره و غیره در یک بانک اطلاعاتی متمرکز مستند می‌شوند. با استفاده از این داده‌ها می‌توان یک دید کلی از وضعیت شیب حرارتی زمین به دست آورد و طراحی اولیه پروژه‌های مدنظر متناسب با وضعیت منطقه مورد نظر را انجام داد. در غیر این صورت باید برای اجرای پروژه‌هایی مانند نصب سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، با استفاده از تجهیزات خاصی دمای زیرسطحی را تا عمق مورد نظر اندازه‌گیری کرد. در کشور ما مطالعات سیستماتیکی به منظور بررسی تغییرات دما با افزایش عمق صورت نگرفته است، اما بر اساس برخی داده‌ها، توسط نورالهی و همکاران نموداری از این تغییرات ارائه شده که در شکل ۴ ارائه شده است.

1. Heat capacity



شکل ۴. تغییرات دما با افزایش عمق طی سال بر اساس داده‌های موجود در کشور [۳۴]

این اطلاعات زیرسطحی بیشتر برای نصب سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ضروری است، زیرا لوله‌گذاری آن‌ها در عمق بیشتری صورت می‌گیرد. در مورد دالان‌های زمین‌گرمایی استفاده از این اطلاعات در طراحی سیستم کاربرد دارد و از آنجا که عمق استقرار لوله‌ها در دالان‌ها معمولاً کمتر از ۵ متر است، استخراج داده‌ها بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است.

۳. مشخصات فنی دالان زمین‌گرمایی

عملکرد دالان‌های زمین‌گرمایی وابسته به پارامترهایی نظیر جنس لوله‌ها، ابعاد هندسی (طول و قطر لوله‌ها) عمق تدفین لوله‌ها، سرعت هوا و جنس و دمای خاک است. این پارامترها روی کارایی حرارتی دالان‌های زمین‌گرمایی اثرگذار هستند و بررسی تأثیر آن‌ها، به منظور رسیدن به آسایش حرارتی^۱ ضروری است. در کنار پارامترهای یادشده نحوه طراحی سیستم نیز نقش مهمی در کارایی آن دارد، این موضوع به‌ویژه در مورد گلخانه‌ها که فضای لازم را در اختیار دارند دارای اهمیت بیشتری است. بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، این سیستم‌ها می‌توانند COP بیشتر از ۶ را به دست آورند [۳۵]. گرچه میانگین COP برای سرمایه‌ش معمولاً کمتر از این مقدار است.

۳-۱. جنس لوله‌ها^۲

جنس لوله‌های نصب‌شده در زیر زمین می‌تواند تا حدودی روی دمای خروجی تأثیرگذار باشد. موادی که هدایت حرارتی بالایی دارند، سرعت انتقال حرارت بالایی نیز دارند، در نتیجه مواد به‌کاررفته در لوله‌ها می‌توانند نقش مهمی در انتقال حرارت داشته باشند. بررسی پروژه‌های اجراشده مربوط به دالان زمین‌گرمایی در نقاط مختلف دنیا، حاکی از آن است که انتخاب جنس و مواد تشکیل‌دهنده لوله‌ها در سیستم‌های احداث‌شده، بر اساس در دسترس بودن و هزینه تأمین آن‌ها بوده است. بررسی تأثیر لوله‌گذاری بر عملکرد یک سیستم دالان زمین‌گرمایی در قالب مطالعات موردی زیر شرح داده شده است.

بانسال و همکاران [۳۶]، با استفاده از شبیه‌سازی (CFD^۳) طی تابستان عملکرد دالان‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه از مواد مختلف برای لوله‌های نصب‌شده استفاده شد و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی با تغییر جنس لوله‌ها، تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در نتیجه، استفاده از مواد ارزان‌تر در ساخت لوله‌ها را پیشنهاد دادند.

1. Thermal comfort
2. Pip materials
3. Computational fluid dynamics

آسیون و همکاران [۳۷] عملکرد این سیستم‌ها را برای تهویه ساختمان‌های مسکونی در سه نوع آب و هوای مختلف در کشور ایتالیا مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج تحقیق یادشده مشخص می‌کند که استفاده از بتن، مواد پلاستیکی و مواد فلزی برای انتقال جریان هوا در این سیستم‌ها، عملکرد یا کارایی بسیار مشابهی دارند. در حقیقت، به علت ضخامت کم لوله‌ها (۵ میلی‌متر در PVC، ۷ میلی‌متر در لوله‌های فلزی و ۷ سانتی‌متر برای بتن) میزان هدایت حرارتی آن‌ها نزدیک به هم است و این اختلاف قابل صرف نظر کردن است.

سانوزی و همکاران [۳۸] این سیستم‌ها را در اقلیم‌های گرم و مرطوب مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه از لوله‌هایی از جنس پلی اتیلن، PVC، لوله‌هایی از جنس خاک رس و لوله‌های آجری نیز استفاده شده است. بهترین نتیجه‌ای که به دست آمده مربوط به لوله‌های رسی است، اما نصب این لوله‌ها همراه با مشکلاتی همراه بوده و مانند لوله‌های PVC دچار شکستگی شده‌اند و دوام آن‌ها نسبت به لوله‌های پلی اتیلن کمتر است.

نور و همکاران [۳۹] مطالعاتی را به منظور انتخاب مناسب‌ترین مواد به‌کاررفته در لوله‌های دالان زمین‌گرمایی در کشور مالزی انجام داده‌اند. در این مطالعه سه روش مختلف لوله‌گذاری مورد استفاده قرار گرفته که شامل لوله‌های با جنس یکسان^۱، لوله‌های هیبرید که ترکیبی از لوله‌های با مواد مختلف است و لوله‌های هیبرید عایق‌دار بودند. از بین این سه روش لوله‌های هیبرید عایق‌دار بهترین عملکرد را در کاهش دما نشان می‌دهند در این مطالعه تحقیقاتی از آن به عنوان یک روش امیدوارکننده سرمایه‌ش برای استفاده در اقلیم گرم و مرطوب یاد شده است. در روش لوله‌های با جنس یکسان که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، لوله‌های پلی اتیلن بیشتری کاهش دما را نشان می‌دهند. پس از آن از نظر عملکرد، به‌ترتیب لوله‌های فولادی، مسی و PVC قرار دارند.

احمد و همکاران [۴۰] یک مدل حرارتی را برای سیستم سرمایه‌شی در حالت افقی، در آب و هوای گرم ساب تروپیکال در منطقه راکهمپتون^۲ در کشور استرالیا توسعه دادند. این مطالعه روی پارامترهای تأثیرگذار در کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی صورت گرفته است. جنس لوله‌های به‌کاررفته در این مطالعه PVC، پلی اتیلن و رسی بوده است. نتایج این مطالعات حاکی از آن بود که بیشترین کاهش دما مربوط به لوله‌های رسی به‌کاررفته در سیستم بوده است.

سراج‌الدین و همکاران [۴۱] سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی را در کشور مصر مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق جنس لوله‌ها از PVC، فولاد و مس انتخاب شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده دمای خروجی از لوله‌ها با تغییر جنس لوله‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

در شکل ۵ تصویر لوله‌گذاری یک سیستم دالان زمین‌گرمایی ارائه شده است.



شکل ۵. تصویری از نحوه استقرار لوله‌های پلی اتیلنی مربوط به یک سیستم دالان زمین‌گرمایی

۳-۱-۱. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مربوط به جنس لوله‌ها

بر اساس مطالعات صورت‌گرفته، در احداث و راه‌اندازی یک سیستم دالان زمین‌گرمایی لوله‌هایی از جنس مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (جدول ۲). گرچه لوله‌هایی که هدایت حرارتی بالایی دارند، می‌توانند کارایی یک سیستم دالان زمین‌گرمایی را افزایش دهند، اما در مقایسه با هزینه مورد نیاز، این امر توجیه مناسبی ندارد. به عنوان مثال، موادی همچون مس و فولاد در مقایسه با PVC و پلی اتیلن بسیار گران‌تر بوده و قابلیت دسترسی کمتری دارند.

جدول ۲. مواد مختلف به‌کاررفته در تهیه لوله‌های سیستم دالان زمین‌گرمایی در پروژه‌های تحقیقاتی مختلف

جنس لوله‌های مورد استفاده	محقق
PVC	Bansal et al
PVC، فولاد و بتن	Ascionne et al
پلی اتیلن، PVC، آجر و رس	Sanusi et al
پلی اتیلن، مس، PVC	Aziah et al
پلی اتیلن متراکم، آهن گالوانیزه	Jahkar et al
PVC، پلی اتیلن، بتن و رس	Ahmed et al
PVC، فولاد و مس	Seragedin et al

در نتیجه در مورد تأثیر جنس لوله‌های نصب‌شده در زیر زمین بر کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که جنس لوله‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کارایی سیستم نداشته و میزان آن قابل صرف نظر کردن است. در نتیجه، انتخاب جنس لوله‌ها بیشتر باید بر اساس دسترسی و هزینه تأمین آن‌ها باشد. بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته در ایران، لوله‌های پلی اتیلنی با توجه به قیمت و قابلیت دسترسی، بهترین گزینه برای سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی هستند.

۳-۲. ابعاد هندسی و طراحی سیستم

طراحی سیستم دالان زمین‌گرمایی و ابعاد هندسی لوله‌های نصب‌شده، نقش مهمی در کارایی آن‌ها دارد. پارامترهای که باید برای این منظور در نظر گرفته شوند شامل طول لوله‌ها، عمق تدفین، قطر لوله‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها است. معمولاً طول لوله‌های دفن‌شده بین ۲۰ تا ۶۰ متر در نظر گرفته می‌شود و در عمق ۲ تا ۴ متری زمین قرار می‌گیرند. لوله‌ها به صورت افقی با یک شیب ملایم، جهت تخلیه قطرات حاصل از رطوبت، نصب می‌شوند. مطالعات زیادی در خصوص ابعاد هندسی لوله‌ها در دالان زمین‌گرمایی صورت گرفته است که در ادامه شرح مختصری از آن‌ها ارائه می‌شود.

گوسال و تیواری [۴۲] به منظور استفاده از پتانسیل این سیستم‌ها، یک مدل را برای تأمین سرمایش و گرمایش گلخانه‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه پژوهشی، عوامل مختلفی از جمله طول لوله‌ها، قطر لوله‌ها، سرعت جریان هوا، عمق تدفین و نوع خاک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، طول لوله‌های نصب‌شده در زیر زمین روی تغییرات دمای گلخانه‌ها تأثیرگذار بوده است. افزایش طول لوله‌ها از ۳۰ متر به ۵۰ متر، باعث افزایش دمای گلخانه‌ها در زمستان و کاهش دمای آن‌ها در تابستان شده است. علت این امر تبادل حرارت بهتر بین هوا و زمین، با افزایش طول لوله‌ها بوده است. افزایش قطر لوله‌ها در این مطالعه به کارایی کمتر این سیستم منجر شده، به طوری که گرمایش گلخانه در زمستان کمتر و سرمایش آن نیز طی تابستان کاهش یافته است. این موضوع به دلیل کاهش انتقال حرارت از زمین است که ناشی از افزایش سطح لوله‌ها و جریان هوای آهسته‌تر بوده است.

چیه‌زا [۴۳] کارایی دالان‌های زمین‌گرمایی را برای اقلیم‌های مختلف در ایتالیا مورد مطالعه قرار داده است. در این مطالعه ضخامت لوله‌ها بسیار کم در نظر گرفته شده است (برای لوله‌های PVC ضخامت ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده، برای مواد فلزی ۷ میلی‌متر و برای بتن ضخامت دیواره ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است). هدایت حرارتی متفاوت این مواد به‌ندرت تبادل حرارت را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که اگر طول مناسب و عمق تدفین مناسب برای لوله‌ها در نظر گرفته شود، جنس

لوله‌ها تأثیر چندانی نداشته است. درخور یادآوری است استفاده از لوله‌های بتنی نیازمند یک پوشش داخلی نیز است. این موضوع به منظور جلوگیری از نفوذ احتمالی گازها مضر و شرایط بهداشتی مناسب‌تر است.

بر اساس نتایج این مطالعه که در چند نقطه با شرایط اقلیمی مختلف صورت گرفته است، با افزایش طول لوله‌های دفن‌شده، تبادل حرارت بین زمین و هوا افزایش می‌یابد، به طوری که لوله‌های با طول ۱۰ متر نتایج رضایت‌بخشی را به همراه ندارند. در این مقاله، بهترین طول انتخاب‌شده برای لوله‌ها ۵۰ متر بوده است. گرچه این موضوع تا حدودی به شرایط اقلیمی نیز بستگی دارد.

ذکر این نکته نیز ضروری است که طول زیاد لوله‌ها هم تغییری در هدایت حرارتی ایجاد نمی‌کند، به طوری که لوله‌های با طول بیشتر از ۷۰ متر نتایج بهتری به دنبال نداشته‌اند [۴۴]. در این خصوص، باید اشاره کرد که افزایش طول لوله، سبب افزایش افت فشار و توان پمپ مورد نیاز می‌شود که بالا رفتن هزینه‌ها را در پی دارد. در این مطالعه تأثیر عمق تدفین لوله‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده هرچه عمق لوله‌گذاری بیشتر باشد، دمای زمین از پایداری بهتری برخوردار است که سبب بازبایی حرارتی بهتر صورت می‌گیرد و نتایج بهتری ارائه می‌شود. در برخی مطالعات انجام‌گرفته لوله‌گذاری در عمق ۳ متری نتایج بهتری نسبت به عمق یک متری داشته، اما در اعماق بیشتر از ۳ متر تغییرات چشمگیر نبوده است. در نتیجه، اگر هزینه‌های گودبرداری بالا نباشد، می‌توان تا عمق بیشتر از ۳ متری نیز حفاری کرد، در حالی که در مناطق سنگی که هزینه‌های حفاری بالاتر است بیشترین عمق را می‌توان ۳ متری زیر سطح زمین در نظر گرفت.

گوسال و تیواری [۴۵] عملکرد این سیستم‌ها را در هندوستان مورد بررسی قرار داده‌اند. محققان در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده دمای هوا در سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی شامل افزایش طول لوله‌ها، کاهش قطر لوله‌ها، کاهش سرعت جریان هوای داخل لوله‌ها و افزایش عمق تدفین تا حدود ۴ متری است.

بانسال و همکاران [۴۶] کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی را طی تابستان در منطقه جاییپور^۱ در کشور هندوستان را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پروژه طول لوله‌ها ۲۳/۴ متر و سرعت جریان هوا ۲ (m/s) بوده است. جنس لوله‌ها نیز از مواد PVC و فلزی بوده است. میزان کاهش دما طی سرمایش برای سیستم بین ۸ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد بوده است. در این پروژه نیز جنس مواد به‌کاررفته در لوله‌ها نقش چندانی در کارایی سیستم نداشته و طول مناسب لوله‌ها و سرعت جریان هوا کنترل‌کننده کارایی سیستم بوده است.

عبدالرحمان و الغنام [۴۷] COP یک سیستم دالان زمین‌گرمایی بسته را در یک گلخانه مورد بررسی قرار داده‌اند. مبدل حرارتی سیستم شامل ۱۵ لوله PVC به طول هر یک ۲۱ متر و قطر ۱۵/۲ سانتی‌متر است که در عمق ۳ متری زیر زمین دفن شده‌اند. هوا از یک سمت گلخانه وارد لوله‌ها می‌شود و پس از چرخش از سمت دیگر وارد فضای گلخانه می‌شود. طول این گلخانه ۲۹/۲ متر و عرض آن ۹/۲ متر بوده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده میانگین COP سیستم ۶/۳۲ بوده است. بیشترین مقدار COP نیز مربوط به گرمایش سیستم و مقدار آن ۶/۹ بوده است.

بانسال و همکاران [۴۸] این سیستم‌ها را طی زمستان در منطقه اجمیر^۲ در غرب هندوستان مورد مطالعه قرار داده‌اند. لوله‌گذاری سیستم در عمق ۲/۷ متری در یک زمین مسطح با خاک خشک صورت گرفته است. جنس لوله‌های مورد آزمایش PVC و فلزی بوده است. سرعت جریان هوا بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه و طول لوله‌ها ۲۳/۴۳ متر انتخاب شده است. قطر لوله‌های به‌کاررفته ۱۵ سانتی‌متر بوده است. نتایجی که از این سیستم به‌دست‌آمده حاکی از آن است که افزایش دمای ۴/۵ تا ۵ درجه سانتی‌گراد را طی زمستان ارائه داده است.

سانوسی و همکاران [۳۸] پتانسیل و کارایی این سیستم‌ها را در اقلیم‌های گرم و مرطوب مالزی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه از ۳ لوله پلی اتیلن به قطر ۷۶ میلی‌متر و طول ۳۰ متر استفاده شده است. هر سه لوله به طور جداگانه در اعماق نیم متری، یک متری و یک و نیم متری دفن شده‌اند. فن‌های دمنده هم در بخش ورودی لوله‌ها نصب شده‌اند و هوا را با سرعت ۵/۶ متر بر ثانیه در لوله‌ها به حرکت درمی‌آورند. نتایج حاصل از این پروژه نشان می‌دهد بیشترین کاهش دما در فصل مرطوب

۶/۴ درجه سانتی‌گراد بوده است. و در فصل خشک و گرم ۷ درجه سانتی‌گراد دما را کاهش داده است. این کاهش دما در حالتی به دست آمده است که عمق تدفین لوله‌ها، یک متر، طول آن‌ها ۳۰ متر و جنس لوله‌ها از PVC بوده است. این آزمایش در سه عمق مختلف صورت گرفته است (۱، ۱/۵ و ۰/۵ متری) به علت افزایش وزن خاک در عمق ۱/۵ متری زیر سطح زمین، در برخی از نقاط قبل از اندازه‌گیری پارامترها، لوله‌های PVC دچار شکستگی شدند. این موضوع نشان‌دهنده این است که لوله‌های PVC دوام کمتری در مقایسه با لوله‌های پلی اتیلن دارند. در این آزمایش لوله‌هایی از جنس رس و لوله‌های آجری نیز مورد استفاده و آزمایش قرار گرفتند، که بهترین نتایج مربوط به لوله‌های رسی بوده است.

میسرا [۴۹] یک مدل را بر اساس میزان تبادل حرارت و تأثیر زمان تبادل بین خاک و لوله‌ها، قطر لوله‌ها و جریان هوا مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از سه قطر متفاوت برای لوله‌ها استفاده شده است (۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر) و سرعت جریان هوا یکسان در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی با افزایش قطر و پس از ۲۴ ساعت کار مداوم، کاهش یافته است (این موضوع به‌خصوص زمانی که طول لوله‌ها کمتر از ۲۰ متر است، مشهود است). در حالتی که لوله‌ها قطر کمتری دارند، اما طول آن‌ها بیشتر از ۳۰ متر است نیز کارایی حرارتی کاهش یافته که ناشی از افزایش افت فشار اصطکاکی درون لوله است که باید بر اساس قطر و طول لوله، ابهام هندسی سیستم بهینه شود.

احمد و همکاران [۴۰] یک مدل حرارتی را به منظور مقایسه کارایی سرمایشی بین دو سیستم مجزای دالان زمین‌گرمایی، توسعه دادند. این مدل در آب و هوای گرم و مرطوب در کوئینزلند استرالیا پیاده‌سازی شده است. در این مطالعه از دو روش لوله‌گذاری افقی^۱ و لوله‌گذاری عمودی^۲ استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد میزان کاهش دما جهت تأمین سرمایش، در سیستم عمودی بهتر از سیستم افقی بوده است. گرچه میزان اختلاف بسیار اندک و حدود یک درجه سانتی‌گراد بوده است.

۳-۲-۱. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مربوط به ابعاد لوله‌ها

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات صورت‌گرفته در مورد ابعاد مبدل حرارتی در دالان‌های زمین‌گرمایی، افزایش طول لوله‌ها کارایی سیستم را افزایش می‌دهد، اما این افزایش طول معمولاً تا ۵۰ متر مؤثر است و بیشتر از آن تغییر محسوس در دمای خروجی ندارد. قطر و ضخامت لوله‌ها نیز از عوامل تأثیرگذار است، به طوری که با افزایش قطر و ضخامت، کارایی سیستم کاهش می‌یابد. عمق تدفین لوله‌ها به صورت تئوریک هرچه بیشتر باشد تأثیر مثبتی بر عملکرد سیستم دارد، اما از آنجا که در اعماق بیشتر از ۴ متری تغییرات خیلی محسوس نیست نیاز به لوله‌گذاری در اعماق زیاد نیست، زیرا هزینه اجرای پروژه‌ها را بالا می‌برد.

۳-۳. جریان هوا

جریان هوا^۳ یا سرعت جریان حجمی هوا یکی از مؤلفه‌هایی است که روی کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی تأثیر می‌گذارد. در این سیستم‌ها برای انتقال جریان هوا از فن‌های ورودی^۴، فن‌های خروجی^۵ و یا هر دو استفاده می‌شود. گوسال و تیوالی [۴۵] با توسعه یک مدل حرارتی نقش سرعت جریان هوا را در تأمین سرمایش و گرمایش یک دالان زمین‌گرمایی در دهلی نو مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده افزایش سرعت جریان هوا در لوله‌ها، باعث کاهش دمای خروجی سیستم در زمستان و افزایش دمای خروجی در تابستان شده است. این موضوع به معنای کاهش کارایی سیستم است و دلیل آن کوتاه‌تر شدن زمان تماس هوا با خاک است که به تبادل حرارت کمتر بین خاک و هوا منجر شده است. افزایش سرعت هوا برای جلوگیری از افت فشار در طول مسیر، باعث افزایش مصرف برق در فن دمنده نیز می‌شود.

میسرا [۴۹] در یک مطالعه سه حالت مختلف برای جریان هوا را مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه قطر لوله‌ها ثابت (۱۰ سانتی‌متر) بوده است و هوا با سرعت‌های ۸، ۵ و ۲ متر بر ثانیه در سیستم به گردش درآمده است. بر اساس نتایج

1. Horizontal Earth Piping
2. Vertical Earth Piping
3. Air flow
4. Intake fans
5. Exhaust fans

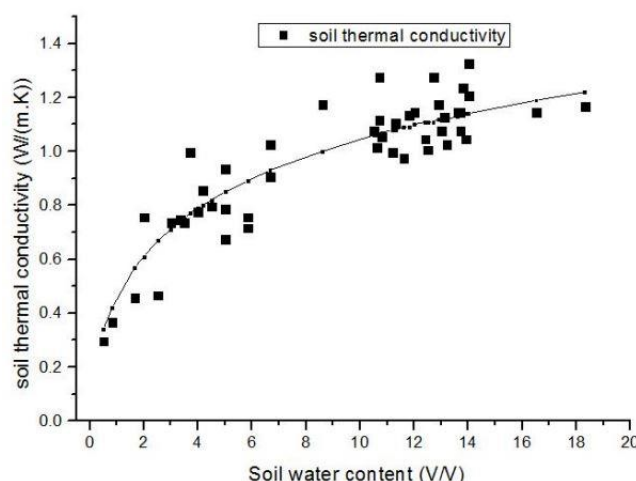
به‌دست‌آمده افزایش سرعت جریان هوا، کارایی سیستم را کاهش داده است. دلیل این موضوع را نیز این‌گونه تفسیر کرده‌اند که با افزایش سرعت هوا، میزان حرارتی که از هوا به خاک انتقال پیدا می‌کند (در هر واحد) افزایش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود حرارت بیشتری در لایه‌های خاک مجاور لوله‌ها جمع شود و هدایت حرارتی را پایین می‌آورد. در نتیجه، افزایش سرعت هوا تأثیر منفی بر کارایی دالان زمین‌گرمایی دارد.

جاهکار و همکاران [۵۰] در منطقه اجمیر هندوستان یک مدل را برای فصل زمستان شبیه‌سازی کردند که در آن عوامل مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق کارایی سیستم در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بهترین سرعت جریان هوا ۵ متر بر ثانیه عنوان شده که بیشترین افزایش دما را طی زمستان داشته است.

۳-۴. نوع خاک

یکی از عواملی که بر کارایی سیستم دالان زمین‌گرمایی تأثیرگذار است، نوع خاک منطقه‌ای است که لوله‌های دفن شده را محصور می‌کند. خاک‌ها علاوه بر خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی دارای خصوصیات حرارتی خاص خود نیز هستند. ویژگی‌های حرارتی خاک به عوامل مختلفی مانند نوع خاک، درجه اشباع‌شدگی، دانه‌بندی، تخلخل و غیره بستگی دارد. بهترین ترکیب خاک برای کارایی این سیستم‌ها به ترتیب خاک‌های ماسه‌ای، ماسه دارای گیاه خاک، ماسه‌های گراولی و سیلت‌های حاوی گیاه خاک هستند [۴۹]. این خاک‌ها انتقال حرارت بهتری دارند و باعث عملکرد بهتر سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی می‌شوند. رسانایی گرمایی خاک، نقش اساسی در انتقال حرارت دارد که خود به میزان رطوبت و تراکم خاک مورد نظر بستگی دارد [۵۱]. دانه‌بندی نیز از عوامل تأثیرگذار در انتقال حرارت است. به عنوان مثال، در خاک‌های ماسه‌ای زمانی که افزایش رسانایی مد نظر است، ماسه‌های دارای دانه‌بندی خوب، عملکرد مناسبی دارند و در صورتی که عایق‌بندی حرارتی مدنظر باشد، ماسه‌های با دانه‌بندی ضعیف مناسب هستند.

یکی از خصوصیات مهم خاک میزان رطوبت آن است. بهترین کارایی دالان‌های زمین‌گرمایی در خاک‌های مرطوب است و در برخی مناطق به منظور کارایی بهتر رطوبت‌دهی به خاک نیز انجام می‌گیرد (شکل ۶). ذکر این نکته ضروری است که خاک‌های اشباع به دلیل شرایط انتقال حرارت خاصی که دارند، برای دفن لوله‌های مبدل، نیاز به حفاری بیشتری دارند و میزان کارایی دالان در بخش‌های سطحی، کمتر است. در نتیجه، خاک‌های دارای درجه خاصی از اشباع‌شدگی، می‌توانند بیشترین هدایت حرارتی را داشته باشند.



شکل ۶. رابطه بین هدایت حرارتی و میزان رطوبت خاک [۵۲]

بانسال و همکاران [۴۹] مطالعاتی را روی تأثیر هدایت حرارتی خاک در کارایی یک سیستم دالان زمین‌گرمایی در اقلیم گرم و خشک انجام داده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده، حداکثر کاهش دما در تابستان، با فرض ثابت ماندن سایر عوامل، مربوط به خاک‌هایی بوده است که هدایت حرارتی بالاتری دارند. برای کارایی بهتر این سیستم‌ها خاک‌هایی که در مجاورت

لوله‌ها قرار می‌گیرند باید بیشترین هدایت حرارتی را داشته باشند. اثر نوع خاک روی کارایی دالان زمین‌گرمایی به‌خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است. یکی از نکاتی که در مورد نوع خاک باید مد نظر قرار داد، احداث اکثر سوله‌های صنعتی و گلخانه‌ها در آبرفت‌های رسوبی است، مکان‌هایی که جنس خاک بسیار متنوعی دارند و از یک مدل رسوب و کانی تشکیل نشده‌اند، اما می‌توان با انتقال خاک‌هایی که هدایت حرارتی بالاتری دارند به محل دفن لوله‌ها، کارایی سیستم را بهبود بخشید. این موضوع مستلزم صرف هزینه و دسترسی به خاک‌های مورد نظر است، در نتیجه خیلی مورد توجه کاربران دالان زمین‌گرمایی قرار نمی‌گیرد.

۴. مزایای بهره‌برداری از دالان‌های زمین‌گرمایی

- استفاده از این سیستم‌ها برتری و مزایای قابل توجهی نسبت به سایر سیستم‌های تأمین انرژی به‌ویژه در گلخانه‌ها دارد که توجیه‌پذیری آن‌ها را افزایش می‌دهد. از جمله مزایای یادشده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- هزینه احداث پایین: این سیستم‌ها از اجزای ساده‌ای تشکیل شده‌اند و تجهیزات به‌کاررفته در آن‌ها قابل دسترس است. همچنین، هزینه تأمین قطعات آن‌ها نیز کم است. اگر این سیستم‌ها هم‌زمان با ساخت سازه احداث شوند، بخش زیادی از هزینه‌های اولیه آن‌ها نیز کاسته می‌شود و میزان آن به کمتر از ۲۰ درصد هزینه کل می‌رسد.
 - هزینه تعمیر و نگهداری پایین: یکی دیگر از مزایای بهره‌برداری از این سیستم‌ها هزینه تأمین و نگهداری پایین آن‌ها است. به نحوی که در اکثر کشورهایی که از این سیستم‌ها استفاده شده این مزیت به عنوان یکی از مزیت‌های مهم سیستم‌های یادشده عنوان شده است.
 - عدم انتشار آلاینده‌های هوا: در حال حاضر، آلودگی در گلخانه‌ها ناشی از انتشار گاز CO_2 است که بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شود. این موضوع یکی از مشکلات اساسی است که صاحبان گلخانه‌ها در فصل زمستان با آن مواجه‌اند. انتشار گاز CO_2 تأثیر منفی بر بازدهی محصول دارد و گاهی نیز به از بین رفتن برخی از محصولات با حساسیت بالا منجر می‌شود. استفاده از دالان‌های زمین‌گرمایی به منظور تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها، یکی از روش‌های مؤثر جهت کاهش انتشار گازهای مضر، برای محصولات گلخانه‌ای و افزایش راندمان برداشت است.
 - قابلیت استفاده در فصل‌های مختلف سال: همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، کارکرد دالان‌های زمین‌گرمایی بر اساس اصل ثابت بودن دمای زمین است که طی فصل‌های مختلف سال تغییر چندانی در آن ایجاد نمی‌شود. لذا این سیستم‌ها می‌توانند هم در فصل‌های گرم و هم در فصل‌های سرد سال مورد استفاده قرار گیرند.
 - انتقال حرارت یکنواخت: یکنواختی حرارت در فضای گلخانه‌ها از عوامل پارامترهای تأثیرگذار در میزان تولید محصولات گلخانه‌ای است. استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند به یکنواختی حرارت در کل فضای گلخانه منجر شود. با توجه به مساحت گلخانه‌ها، طراحی سیستم‌های دالان‌های زمین‌گرمایی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که حرارت به طور یکنواخت در فضای داخلی آن برقرار باشد. در غیر این صورت، کیفیت و کمیت محصولات تولیدشده در بخش‌های مختلف آن یکسان نخواهد بود.

۵. بهره‌برداری از دالان‌های زمین‌گرمایی در گلخانه‌های کشور

در دهه‌های اخیر استفاده از گلخانه‌ها برای تولید محصولات کشاورزی بسیار مورد توجه بوده است. از جمله مهم‌ترین دلایل این موضوع می‌توان به امکان کنترل عوامل محیطی همچون تغییرات آب و هوایی، تغییر دما و رطوبت، جلوگیری از پدیده‌هایی مانند سرمازدگی و گرم‌زدگی محصولات کشاورزی، استفاده بهینه از منابع خاک و آب، استفاده بهینه از کود و سم، تولید محصول در خارج از فصل زراعی، اشاره کرد [۵۳]. با توجه به مشکلات مربوط به حوزه آب در کشور، توسعه روزافزون صنعت گلخانه امری اجتناب‌ناپذیر است که به برنامه‌ریزی برای توسعه آن نیاز دارد، تأمین انرژی یکی از موانع اصلی توسعه این صنعت است. روش‌های مختلفی برای تأمین انرژی مورد نیاز در گلخانه‌ها با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه شده است که از این بین می‌توان به انرژی خورشیدی، بادی، برق آبی و زمین‌گرمایی اشاره کرد [۵۴-۵۷]. استفاده از انرژی خورشیدی در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته، اما به دلیل غیراقتصادی بودن آن در گلخانه‌ها و محدودیت آن در زمانی که بیشترین نیاز گرمایشی برای گلخانه

مد نظر است (شب‌های زمستان) بهره‌برداری از آن‌ها با چالش‌های فراوانی مواجه است. سایر انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به دلیل قرار گرفتن در موقعیت‌های خاص و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالایی که دارند، امکان استفاده در گلخانه‌های کشور را ندارند. انرژی زمین‌گرمایی به خلاف سایر انرژی‌های تجدیدپذیر مستقل از شرایط آب و هوایی است و در گلخانه‌ها به چند شکل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های آن استفاده از حرارت ذخیره‌شده در لایه‌های سطحی زمین است که گرم و سرد شدن هوا تأثیری روی دمای آن نقطه ندارد و می‌توان از این دمای ثابت برای گرمایش و سرمایش فضاها استفاده کرد. برنامه مدونی برای توسعه گلخانه‌ها در کشور وجود دارد و تأمین انرژی مورد نیاز آن‌ها در حال حاضر نیز با مشکلات جدی همراه است به طوری که گاهی به تعطیلی گلخانه‌ها در برخی از ماه‌های سال منجر می‌شود. بر اساس آمار ارائه‌شده توسط دفتر امور گلخانه وزارت جهاد کشاورزی، میزان مصرف انرژی فعلی در گلخانه‌ها و پیش‌بینی میزان انرژی مورد نیاز آن‌ها تا پایان برنامه توسعه ۱۰ ساله در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. آمار میزان مصرف انرژی در گلخانه‌های کشور و چشم‌انداز ۱۰ ساله آن

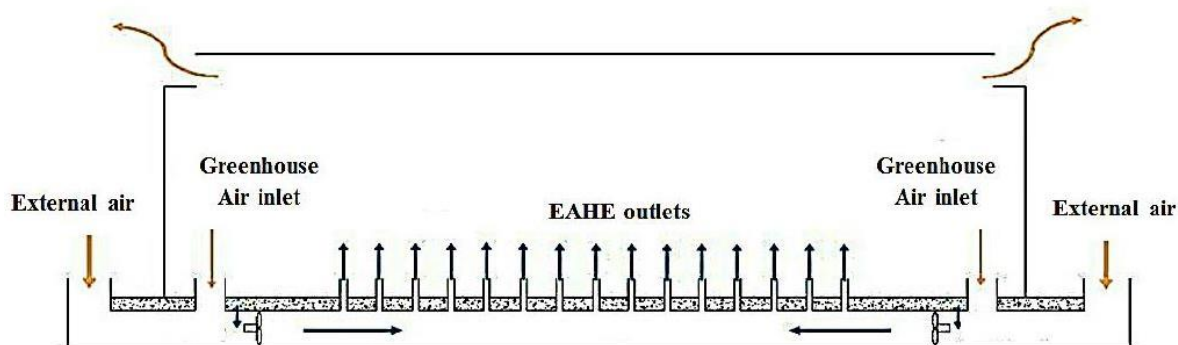
میزان مصرف انرژی	برق (مگاوات)	گاز طبیعی (متر مکعب)	گازوئیل (لیتر)
به ازای هر هکتار	۰,۱۳	۳۰۰/۰۰۰	۲۵۰/۰۰۰
مصرف کل در کشور	۲/۱۰۰	۳/۳۶۰/۰۰۰/۰۰۰	۱/۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰
پیش‌بینی تا سال ۱۴۱۰	۸/۰۰۰	۷/۱۴۰/۰۰۰/۰۰۰	۲/۵۵۰/۰۰۰/۰۰۰

به منظور کاهش انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها، یکی از راهکارهای کم‌هزینه که مد نظر صاحبان گلخانه است، استفاده از دالان‌های زمین‌گرمایی است. با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پایین و امکان بهره‌برداری در اکثر نقاط کشور این سیستم‌ها در برخی از مناطق کشور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از پروژه‌های اجراشده در کشور حاکی از این است که این سیستم‌ها می‌توانند به عنوان یکی از راهکارهای اساسی تأمین انرژی (بخشی از انرژی) در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. ذکر این نکته ضروری است که دالان‌های زمین‌گرمایی جزء محدود سیستم‌های تجدیدپذیری در کشور هستند که بدون هیچ‌گونه حمایت دولتی در کشور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از موارد مربوط به جذابیت بهره‌برداری از این سیستم‌ها، عدم نیاز به واردات قطعات است. تمامی قطعات به‌کاررفته در این سیستم‌ها، در اکثر مناطق کشور قابل دسترسی هستند که استفاده از این سیستم‌ها را برای سرمایه‌گذار بخش خصوصی جذاب می‌کند. از جمله موارد دیگری که استفاده از این سیستم‌ها را در آینده توسعه خواهد داد، مشکلات مربوط به تأمین گاز در زمستان و برق در تابستان است. در حال حاضر، بسیاری از گلخانه‌های صنعتی در کشور، بیش از دو ماه از سال به دلیل عدم تأمین انرژی یا هزینه بالای تأمین انرژی، غیر فعال هستند. در حالی که در برخی از گلخانه‌ها که دارای سیستم دالان زمین‌گرمایی هستند، امکان تأمین انرژی مورد نیاز طی سال را فراهم کرده‌اند. از آنجا که علاوه بر هزینه‌های تأمین انرژی، بحث سودآوری مربوط به محصولات طی سال نیز مطرح است، بهره‌برداری از دالان‌های زمین‌گرمایی مورد توجه صاحبان گلخانه‌ها قرار گرفته است.

دالان زمین‌گرمایی و کارایی آن‌ها برای بسیاری از تصمیم‌گیرندگان حوزه انرژی تجدیدپذیر در کشور ناشناخته است. به نظر می‌رسد ارائه اطلاعات دقیق فنی - اقتصادی مربوط این سیستم‌ها و پتانسیل بهره‌برداری از آن‌ها در سایر فضاهای سرپوشیده کشور می‌تواند به آشنایی و تغییر نگاه تصمیم‌گیران حوزه انرژی منجر شود. یکی از مزایای مهم این سیستم‌ها، امکان توسعه آن‌ها بدون نیاز به سرمایه‌گذاری دولتی است، که لازمه آن معرفی این سیستم‌ها و ارائه راهکارهایی به منظور جذابیت بهره‌برداری از آن‌هاست.

بررسی‌های اولیه مربوط به پروژه‌های انجام‌شده در کشور نشان می‌دهد امکان احداث این سیستم‌ها در اکثر مناطق کشور وجود دارد. در حال حاضر، بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده، حداقل در ۱۰ استان کشور با شرایط آب و هوایی مختلف این سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در برخی از پروژه‌ها که هم‌زمان با احداث گلخانه، این سیستم‌ها طراحی و نصب شده‌اند، نتایج بسیار خوبی به همراه داشته و هزینه احداث سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی نیز به حداقل رسیده است. به عنوان مثال، می‌توان به پروژه‌ای که در استان البرز اجرا شده است اشاره کرد که در ادامه توضیحاتی در مورد آن ارائه می‌شود [۵۳ و ۵۷].

این پروژه در واقع استفاده از سیستم‌های دالان زمین‌گرمایی در یک گلخانه چنددریچه‌ای به مساحت ۳۸۴۰ متر مربع است. سیستم تأمین سرمایش این گلخانه که همان دالان زمین‌گرمایی است بدون نیاز به هیچ‌گونه سیستم خنک‌کننده مانند فن و پد رطوبت‌دهی طی تابستان سرمایش مورد نیاز را تأمین می‌کند. همچنین، این سیستم بخش عمده گرمایش فضا در زمستان را نیز تأمین می‌کند. این سیستم دارای ۲ ورودی هوای خارجی یا هوای محیط و ۳۰ خروجی در امتداد کف گلخانه است (شکل ۷).



شکل ۷. تصویر شماتیک گلخانه مجهز به سیستم دالان زمین‌گرمایی در استان البرز [۵۷]

بر اساس نتایج ارائه‌شده از پروژه تحقیقاتی که توسط فریدی و همکاران [۵۵] انجام شده است، نوسانات دمای داخل گلخانه‌ها بسیار کمتر از نوسانات محیطی است که این امر حاکی از توزیع یکنواخت دما در داخل گلخانه است. طی فصل تابستان و اوج گرمای منطقه که در تیرماه به ثبت رسیده است، گلخانه در تمامی ۱۸ روزی که حداکثر دمای محیط ثبت شده بود، دارای دمای آسایش برای پرورش گوجه فرنگی (کمتر از ۲۳ درجه سانتی‌گراد) بوده است. این سرمایش بدون استفاده از هرگونه سیستم دیگری و فقط به کمک دالان‌های زمین‌گرمایی تأمین شده است. در این پروژه، میانگین پتانسیل سیستم دالان زمین‌گرمایی برای افزایش دمای ۱۰٫۹۶ درجه سانتی‌گراد در فصل زمستان و میانگین پتانسیل کاهش دمای ۱۷/۹۶ درجه سانتی‌گراد در فصل تابستان است [۵۶].

در شکل ۸ تصاویر مربوط به گلخانه مجهز به سیستم دالان زمین‌گرمایی در منطقه کوهسار استان البرز نشان داده شده است.



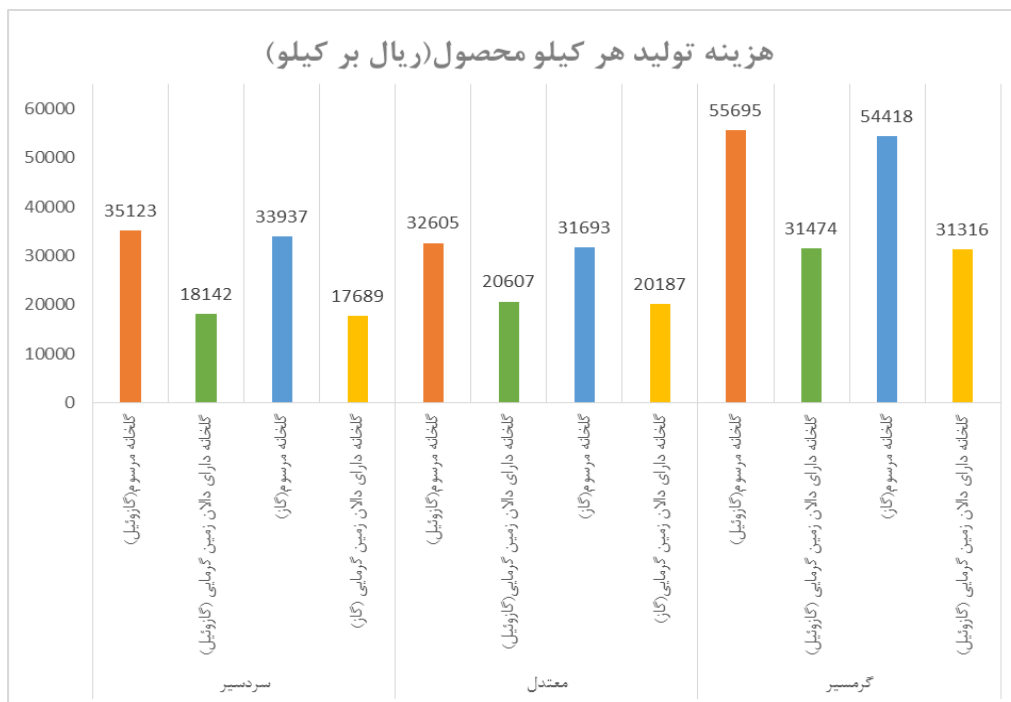
شکل ۸. تصاویری از دالان زمین‌گرمایی احداث‌شده در گلخانه منطقه کوهسار کرج

۵-۱. عملکرد دالان‌های زمین‌گرمایی در گلخانه‌های مجهز به این سیستم‌ها در کشور

سرمایش و گرمایش گلخانه‌ها در مناطقی که دمای محیط خیلی پایین‌تر و یا خیلی بالاتر از دمای مد نظر برای گلخانه است، بسیار پرهزینه خواهد بود. در گلخانه‌های مدرنی که نگرانی از بابت حفظ منابع آب و انرژی وجود ندارد، سرمایش و گرمایش فضای گلخانه‌ها از طریق تهویه مطبوع، فن و پد، استفاده از مه‌پاش‌های خنک‌کننده، گرمایش تابشی و استفاده از بخاری‌های گازی و گازوئیلی صورت می‌گیرد، که همگی انرژی مصرفی خود را از برق یا سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کنند. در گلخانه‌های مجهز به سیستم دالان زمین‌گرمایی، به دلیل عایق‌بندی مناسبی که هنگام ساخت آن‌ها صورت گرفته، میزان صرفه‌جویی انرژی بسیار زیاد است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از عملکرد این سیستم‌ها در گلخانه‌های کشور توسط پژوهشگاه نیرو صورت گرفته است. به این منظور، با مالکان گلخانه‌های مجهز به این سیستم‌ها در نقاط مختلف کشور، ارتباط برقرار شد و بر اساس اطلاعات دریافتی، مشخص شد که از بین همهٔ موارد بررسی‌شده، گلخانه‌های واقع در مناطق سردسیر، بیشترین میزان کاهش مصرف سوخت را داشته‌اند. در واقع، در گلخانه‌های یادشده، با استفاده از این سیستم‌ها، مصرف سوخت گلخانه‌ها تا حدود ۷۰ درصد نیز کاهش یافته است که بدون شک، عدد قابل توجهی محسوب می‌شود. این در حالی است که در گلخانه‌های واقع در مناطق گرمسیر، مصرف سوخت تا ۱۰۰ درصد کاهش یافته است (حجم سوخت مصرفی بسیار کمتر از مناطق سردسیر است). میزان کاهش مصرف برق برای تأمین سرمایش گلخانه‌ها در فصل تابستان نیز حدود ۵۰ درصد اعلام شده است. در مورد صرفه‌جویی در مصرف برق، نکتهٔ شایان یادآوری آنکه، این میزان صرفه‌جویی در فصل‌های گرم (حد فاصل ماه‌های اردیبهشت تا مهر) صورت می‌گیرد که هم‌زمان با پیک مصرف برق در کشور نیز هست. در مقام مقایسه، در فصل زمستان، مصرف برق در گلخانه‌های مجهز به سیستم دالان زمین‌گرمایی از گلخانه‌های مرسوم بیشتر است. دلیل این امر، فعال بودن این سیستم‌ها به منظور تأمین گرمایش فضای گلخانه‌ها است. در واقع، در این حالت، برق مصرفی مربوط به فعالیت فن‌ها است. حال آنکه، در گلخانه‌های مرسوم، تمام گرمایش فضای گلخانه‌ها توسط سوخت‌های فسیلی (گاز و گازوئیل) تأمین می‌شود.

نتایج مطالعات اقتصادی بهره‌برداری از دالان‌های زمین‌گرمایی در گلخانه‌های کشور که توسط پژوهشگاه نیرو صورت گرفته حاکی از توجیه اقتصادی بالای استفاده از این سیستم‌ها در گلخانه‌ها است. به منظور بررسی اقتصادی این سیستم‌ها، از رویکرد شاخص هزینه ترازشدهٔ هر واحد از محصول تولیدی و مقایسهٔ آن در اقلیم‌های مختلف کشور از منظر هزینه تمام‌شده، استفاده شده است. هزینه‌های محاسبه‌شده شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تأمین سوخت و هزینه تأمین برق مورد نیاز گلخانه‌ها بوده است. بر همین اساس، قیمت تمام‌شده یک کیلو محصول شاخص بدون در نظر گرفتن سایر هزینه‌های غیرمرتبط با تأمین انرژی، محاسبه شده است. بر همین اساس، تحلیل‌های اقتصادی برای مساحت یک هکتار از گلخانهٔ مورد نظر در سال و در سه اقلیم سردسیر، معتدل و گرمسیر صورت گرفته است. محصول انتخاب‌شده برای برآورد دمای مورد نیاز و شرایط مناسب کاشت در اقلیم‌های متفاوت، خیار در نظر گرفته شده است. دلیل اصلی این انتخاب نیز اختصاص حدود ۶۰ درصد از مساحت گلخانه‌های کشور به کشت خیار است.

نتایج حاصل از مطالعات اقتصادی بهره‌برداری از دالان‌های زمین‌گرمایی در سه اقلیم مختلف (سردسیر، معتدل و گرمسیر) در شکل ۹ ارائه شده است. در این محاسبات هزینه‌های تولید محصول فقط مربوط به روش‌های مختلف تأمین انرژی گلخانه‌ها است و سایر هزینه‌ها که در مورد گلخانه‌های مرسوم و گلخانه‌های مجهز به سیستم دالان زمین‌گرمایی یکسان است در نظر گرفته نشده است. ذکر این نکته ضروری است که این مطالعه در سال ۱۴۰۱ خورشیدی به انجام رسیده است. با توجه به تغییرات نرخ تورم در ایران ممکن است با گذشت زمان تغییرات محسوسی در قیمت‌ها ایجاد شود.



شکل ۹. مقایسه هزینه تولید یک کیلو محصول واحد در یک هکتار گلخانه مرسوم نسبت به گلخانه دارای سیستم دالان زمین گرمایی در اقلیم‌های مختلف کشور در سال ۱۴۰۱

۶. نتیجه‌گیری

دالان‌های زمین گرمایی مبدل‌های حرارتی هستند که در اعماق کم زمین احداث می‌شوند و تبادل حرارت بین فضای مورد نظر و زمین را، به کمک گردش جریان هوا درون زمین فراهم می‌کنند. با استفاده از این سیستم‌های حرارتی و برودتی می‌توان بخشی از انرژی مورد نیاز را از منابع تجدیدپذیر میسر کرد. همان‌طور که از مرور مقالات مشخص شد، سیستم‌هایی که از این نوع مبدل‌های حرارتی بهره می‌برند، به عنوان ارزان‌ترین روش تأمین انرژی گرمایشی و سرمایشی فضاها با کاربردهای مختلف مسکونی، تجاری و صنعتی شناخته می‌شوند. استفاده از سیستم‌های یادشده با توانایی تغییر دمای ۱۰ درجه‌ای، در گلخانه‌ها سبب افزایش کیفیت و میزان تولید محصولات می‌شود و از ضریب عملکرد بالایی برخوردارند (بیشتر از ۶). همچنین، عوامل تأثیرگذار بر عملکرد این سیستم‌ها شناسایی شد که شامل طراحی سیستم، جنس لوله، عمق تدفین، طول لوله و سرعت حرکت هوا هستند. جنس لوله مورد استفاده باید بر اساس مطالعات اقتصادی در نظر گرفته شود، به طوری که لوله‌های پلی اتیلنی با توجه به قیمت مناسب‌تری که دارند، نسبت به لوله‌های فولادی، مسی و غیره، مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین، از مقالات مختلف برداشت شد، عمق ۵ متری، بیشترین عمقی است که به صورت اقتصادی می‌توان مبدل‌ها را احداث کرد. مطالعات انجام‌شده نشان دادند سرعت حرکت هوا نیز باید به صورت بهینه انتخاب شود تا علاوه بر تهویه مطبوع فضا، سیستم شاهد تبادل نرخ انتقال حرارت مناسبی از طرف زمین به سیال باشد، چراکه با افزایش سرعت چرخش هوا، این میزان کاهش پیدا می‌کند. نتایج مطالعات اقتصادی بهره‌برداری از دالان‌های زمین گرمایی در گلخانه‌های کشور حاکی از توجیه اقتصادی بالای استفاده از این سیستم‌ها در گلخانه‌ها است. هزینه تولید (هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و انرژی) در سال ۱۴۰۱، برای هر کیلو محصول واحد در اقلیم سردسیر در گلخانه‌های مرسوم با سوخت گازوئیل برابر با ۳۵۱۲۳ ریال و در گلخانه‌های مرسوم با سوخت گاز ۳۳۹۳۷ ریال است. برای گلخانه‌های مجهز به سیستم دالان زمین گرمایی با سوخت گازوئیل، در این اقلیم، هزینه تولید هر کیلو محصول واحد برابر با ۱۸۱۴۲ ریال و برای گلخانه‌های مجهز به دالان زمین گرمایی با سوخت گاز ۱۷۶۸۹ ریال است که همان‌گونه که مشخص است، اختلاف قابل ملاحظه‌ای با گلخانه‌های فاقد دالان زمین گرمایی دارد.

منابع

- [1] O. J. Svec, L. E. Goodrich, and J. H. L. Palmer, "Heat transfer characteristics of in-ground heat exchangers," *Energy Research*, vol. 7, pp. 265–278, 1983.
- [2] F. Ascione, L. Bellia, and F. Minichiello, "Earth-to-air heat exchangers for Italian climates," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2177–2188, 2011.
- [3] A. Bessa, M. Alves, and A. Leoni, "Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the Brazilian climatic regions," *Energy and Buildings*, vol. 90, pp. 41–50, 2015.
- [4] H. Yang, P. Cui, and Z. Fang, "Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 16–27, 2010.
- [5] D. Adamovsky, P. Neuberger, and R. Adamovsky, "Changes in energy and temperature in the ground mass with horizontal heat exchangers – the energy source for heat pumps," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 107–115, 2015.
- [6] G. Go, S. Lee, S. Yoon, and M. Kim, "Optimum design of horizontal ground-coupled heat pump systems using spiral-coil-loop heat exchangers," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 330–345, 2016.
- [7] S. Sanaye and B. Niroomand, "Horizontal ground coupled heat pump: thermal-economic modeling and optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 2600–2612, 2010.
- [8] N. Bordoloi, A. Sharma, H. Nautiyal, and V. Goel, "An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 261–280, 2018.
- [9] O. J. Svec, L. E. Goodrich, and J. H. L. Palmer, "Heat transfer characteristics of in-ground heat exchangers," *Energy Research*, vol. 7, pp. 265–278, 1983.
- [10] G. Yoon, H. Tanaka, and M. Okumiya, "Study on the design procedure for a multi-cool/heat tube system," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1415–1424, 2009.
- [11] REHAU, "Ground air heat exchanger: Banff & Buchan College, Fraserburgh, Scotland," [Online]. Available: <https://www.rehau.com/download/785920/banff-and-buchan-college-case-study.pdf>, 2011.
- [12] A. Shukla, G. N. Tiwari, and M. S. Sodha, "Thermal performance of an adobe structure integrated with an earth-air heat exchanger: an experimental study," *Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal*, vol. 10, pp. 1–14, 2008.
- [13] REHAU, "Ground-air heat exchanger systems: Carclaze community primary school, St Austell, Cornwall," [Online]. Available: <https://www.rehau.com/download/785976/carclaze-school-case-study.pdf>, 2009.
- [14] N. K. Bansal and M. S. Sodha, "An earth-air tunnel system for cooling buildings," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 1, pp. 177–182, 1986.
- [15] REHAU, "Awadukt thermo ground-air heat exchanger system for controlled ventilation," [Online]. Available: <http://pdfs.talktoadm.com/products/AwaduktThermoBrochure2008.pdf>, 2010.
- [16] J. K. Nayak and J. A. Prajapati, *Handbook on Energy Conscious Buildings*. Interactive R & D Project 3/4, 2006.
- [17] M. Santamouris, "Use of earth to air heat exchangers for cooling," *AIVC-Ventilation Information Paper*, pp. 1–8, 2006.
- [18] N. M. Thanu, R. L. Sawhney, R. N. Khare, and D. Buddhi, "An experimental study of the thermal performance of an earth-air-pipe system in single pass mode," *Solar Energy*, vol. 71, pp. 353–364, 2001.
- [19] M. Majumdar, *Energy-Efficient Buildings in India*. Tata Energy Research Institute (TERI), 2001.
- [20] 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. 43, pp. 728–736, 2011.
- [21] A. Kanth and T. Chakraborty, "Numerical analysis of geothermal tunnels," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 740–746, 2015.
- [22] REHAU, "Ground-air heat exchanger system: Wembley Manor School, London," [Online]. Available: <https://www.rehau.com/download/785514/wembley-manor-case-study.pdf>, 2008.

- [23] G. N. Mavroyanopoulos and S. Kyritsis, "The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 36, pp. 263–268, 1986.
- [24] S. Mongkon, S. Thepa, P. Namprakai, and N. Pratinthong, "Cooling performance assessment of horizontal earth tube system and effect on planting in tropical greenhouse," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 225–236, 2014.
- [25] G. Sharan, H. Prakash, and R. Jadhav, "Performance of greenhouse coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in closed-loop mode," Unpublished report, 2004.
- [26] H. Bernier, G. S. V. Raghavan, and J. Paris, "Evaluation of soil heat exchanger storage system for a greenhouse – part I: system performance," *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 33, pp. 93–98, 1991.
- [27] A. Yildiz, O. Ozgener, and L. Ozgener, "Exergetic performance assessment of solar photovoltaic cell (PV) assisted earth to air heat exchanger (EAHE) system for solar greenhouse cooling," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 3154–3160, 2011.
- [28] G. Sharan, "Development and some applications of earth tube heat exchanger in Gujarat," Nanubhai Amin Memorial Lecture, Electrical Research and Development Association (ERDA), Vadodara, 2004.
- [29] N. A. S. Elminshawy, A. M. I. 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.
- [30] A. Sehli, A. Hasni, and M. Tamali, "The potential of earth-air heat exchangers for low energy cooling of buildings in South Algeria," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 496–506, 2012.
- [31] T. S. Bisoniya, "Design of earth–air heat exchanger system," *Geothermal Energy*, vol. 3, no. 1, p. 18, 2015.
- [32] A. E. Ciriaco, S. J. Zarrouk, and G. Zakeri, "Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109515, 2020.
- [33] R. Vidhi, "Organic fluids and passive cooling in a supercritical Rankine cycle for power generation from low grade heat sources," [Online]. Available: <https://scholarcommons.usf.edu/etd/5322>. Accessed Aug. 15, 2018.
- [34] Y. Noorollahi, H. Hamidreza, A. Gh., and R. Ghasempour, "Thermo-economic modeling and GIS-based spatial data analysis of ground source heat pump systems for regional shallow geothermal mapping," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, 2017.
- [35] A. O. Alghannam, "Investigations of performance of earth tube heat exchanger of sandy soil in hot arid climate," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 8, no. 6, pp. 3044–3052, 2012.
- [36] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal, and J. Mathur, "Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 645–648, 2010.
- [37] F. Ascione, L. Bellia, and F. Minichiello, "Earth-to-air heat exchangers for Italian climates," *Renewable Energy*, pp. 2177–2188, 2011.
- [38] A. N. Z. Sanuzi and M. N. Ibrahim, "Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia (hot and humid climates)," *Renewable Energy*, pp. 193–196, 2013.
- [39] A. Noor, A. N. Z. Sanusi, and M. Aminuddin, "Materials for earth air pipe heat exchanger (EAPHE) system as a passive ground cooling technology for hot-humid climate," in *Proc. International Conference on Emerging Trends in Scientific Research*, Pearl International Hotel, Kuala Lumpur, 2014.
- [40] S. Ahmed, M. Amanullah, M. Khan, M. Rasul, and N. Hassan, "Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer," *Energy Conversion and Management*, pp. 324–337, 2016.
- [41] A. Serageldin, A. K. Abdelrahman, and S. Ookawara, "Earth-air heat exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and computational fluid dynamics simulation," *Energy Conversion and Management*, pp. 25–38, 2016.
- [42] M. K. Ghosal, G. Tiwari, D. Das, and K. P. Pandey, "Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating of greenhouse," *Energy and Buildings*, pp. 613–621, 2005.

- [43] G. Chiesa, "Integration of renewable energy in the built environment (electricity, heating and cooling): Climate potential of earth to air heat exchanger," in Proc. International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale (CISBAT), Lausanne, Switzerland, Sep. 6–8, 2017.
- [44] G. Mihalakakou et al., "Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling application," Solar Energy, vol. 55, pp. 355–362, 1995.
- [45] M. Ghosal and G. Tiwari, "Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse," Energy Conversion and Management, vol. 47, no. 13–14, pp. 1779–1798, 2006.
- [46] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agrawal, and J. Mathur, "Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling," Energy and Buildings, vol. 42, pp. 645–648, 2010.
- [47] A. O. Alghannam, "Investigations of performance of earth tube heat exchanger of sandy soil in hot arid climate," Journal of Applied Sciences Research, vol. 8, no. 6, pp. 3044–3052, 2012.
- [48] V. Bansal, R. Misra, G. D. Agarwal, and J. Mathur, "Transient effect of soil thermal conductivity and duration of operation on performance of Earth Air Tunnel Heat Exchanger," Applied Energy, pp. 1–11, 2013.
- [49] R. Misra, V. Bansal, G. D. Agrawal, J. Mathur, and T. K. Aseri, "CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger," Applied Energy, pp. 266–277, 2013.
- [50] S. Jakhar, R. Misra, M. Soni, and N. Gakkhar, "Parametric simulation and experimental analysis of earth air heat exchanger with solar air heating duct," Engineering Science and Technology, pp. 1059–1066, 2016.
- [51] A. Alia, M. Mohameda, M. A. Aala, A. Schellartb, and S. Taitb, "Thermal and hydraulic properties of sandy soils during drying and wetting cycles," ASCE Journal of New Frontiers in Geotechnical Engineering, pp. 129–138, 2014.
- [52] Y. Li, C. Wu, X. Xing, M. Yue, and Y. Shang, "Testing and analysis of the soil thermal conductivity in tropical desert and grassland of West Africa," in Proc. 2012 9th International Pipeline Conference (IPC2012), Calgary, Alberta, Canada, Sep. 24–28, 2012.
- [53] H. Faridi, A. Arabhosseini, Gh. Zarei, and M. Okos, "Application of geothermal energy in meeting the cooling/heating needs of greenhouses," in Proc. 6th Annual Clean Energy Conference, Shiraz University, Shiraz, Iran, Mar. 2019.
- [54] J. Vourdoubas, "Overview of heating greenhouses with renewable energy sources: a case study in Crete-Greece," Journal of Agriculture and Environmental Sciences, vol. 4, no. 1, pp. 70–76, 2015.
- [55] J. Vourdoubas, "Comparison of greenhouse heating with geothermal energy, biomass and solar energy," in Proc. Geothermal Energy Applications in Agriculture, Athens, Greece, 2004.
- [56] V. P. Sethi and S. K. Sharma, "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications," Solar Energy, vol. 82, no. 9, pp. 832–859, 2008.
- [57] H. Faridi, A. Arabhosseini, Gh. Zarei, and M. Okos, "Degree-day index for estimating the thermal requirements of a greenhouse equipped with an air-earth heat exchanger system," Journal of Agricultural Machinery, vol. 11, no. 1, pp. 83–95, 2021.