Research Article

Agricultural Engineering, 46(4) (2024) 453-466
DOI: 10.22055/agen.2024.45418.1703

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Investigating the effect of pipe length and air velocity on the performance indicators of a geothermal system in cooling a sample greenhouse

A. Hedayatipoor[1], M. Soleymani[2,*] and M. Kiani Deh Kiani[3]

1. Ph.D. Student of Agricultural Mechanization Engineering, Department of Biosystems engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Associate professor, Department of Biosystems engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Assistant professor, Department of Biosystems engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Received: 23 December 2023 Accepted: 25 January 2024 *Corresponding Author: M.soleymani@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: The use of Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) has recently been developed as an efficient energy system in heating and cooling residential buildings and agricultural greenhouses mainly due to its availability and low environmental pollution. In this system, air is circulated by a fan through a pipe buried deep in the ground. The soil temperature at a depth of 2-3 meters remains unchanged during the season depending on the geographical location and soil type. Of course, this depth varies throughout the year and according to climatic changes. The heat exchange between the soil and the air inside the pipe depends on the type of soil and its moisture content, the length and diameter of the air transmission pipe, the depth of burial and the velocity of the air flow (air velocity). Air circulation can be done in an open-loop circuit or a closed-loop circuit.

Materials and Methods: A factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized block design with two factors (pipe length at three levels (34, 17 and 52 meters) and air velocity at two levels (5 and 10 m/s)) in three replications, to investigate the effect of these factors on the coefficient of performance (COP), system efficiency and outlet air temperature. The experiment was conducted in a greenhouse in Arak city, Iran, in Joune 2022. The area of the greenhouse was 150 square meter and it was equipped with geothermal equipment. Air was circulated through a 200 mm diameter PVC pipe buried three meters deep in the ground. Air was circulating through an open loop circuit. Dependent variables were measured during the hot hours of the day (from 12:00 to 18:00) for one week at the end of July. The air temperature at the fan inlet and at 17, 34 and 52 meters along the pipe was measured by a single-channel data logger. Hourly changes in outlet air temperature, COP and efficiency were measured in a 24-hour period and plotted using Excel software.

Results and Discussion: The outlet air temperature did not change by reducing the air velocity was from 10 m/s to 5 m/s when the pipe length was 34 or 52 m. But for the pipe length of 17 m, the maximum temperature, COP and efficiency were observed at an air velocity of 5 m/s. Regardless the air velocity, the average temperature of the outlet air for the three levels of the pipe length was

© 2023 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

28.5, 25.5 and 25.3°C, respectively. The outlet air temperature was almost the same for the pipe lengths of 34 and 52 m. In other words, the optimal length of the pipe is about 34 meters. The mean efficiencies for these two pipe length levels were 0.69 and 0.66, but the COP depended on the air velocity. The average COP for air velocity of 5 and 10 m/s was obtained 1.4 and 2.5, respectively. Based on these results, the lowest outlet air temperature, the best cooling efficiency and COP were obtained when the pipe length and the air velocity were 34 m and 10 m/s, respectively. when the length of the pipe was 17 meters, the temperature of the outlet air at two velocities of 10 and 5 m/s was 29.9 and 27 °C, respectively. The cooling efficiency and COP at two velocities of 10 and 5 m/s, were 0.34, 0.54; and 2.1, 1.7 respectively. If the desired temperature is 28-30 °C, pipe length of 17 m and the air velocity of 5 m/s is recommended. The results of hourly performance analysis showed that the biggest difference between inlet and outlet air temperatures is obtained at the middle hours of the day. The higher the ambient temperature, the higher the efficiency of the EAHE system.

Conclusion: This system successfully met the cooling needs of a sample greenhouse in the climate conditions of Markazi Province in June and July. The results showed that, the optimal pipe length and the air velocity for this system are 34 m and 10 m/s, respectively. The average air outlet temperature and cooling efficiency were 25.5 and 0.66 respectively. The higher the ambient temperature, the higher the EAHE efficiency. This is mainly due to the higher temperature difference between the outgoing and incoming air during the hottest hours of the day. As a result, system efficiency and COP increase at the hottest hours of the day.

Keywords: Renewable energy, sustainable engineering, COP, efficiency, geothermal pump, system performance

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۶ شماره۴، زمستان ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

بررسی اثر طول لوله و سرعت هوا بر شاخص‌های عملکردی سامانه زمین‌گرمایی در سرمایش یک گلخانه نمونه

ابوالفضل هدایتی پور[۱]، محسن سلیمانی[۲*] و مصطفی کیانی ده‌کیانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

کلمات کلیدی:

انرژی‌های تجدیدپذیر،

مهندسی پایداری،

ضریب عملکرد،

راندمان،

پمپ زمین‌گرمایی،

عملکرد سامانه

* عهده دار مکاتبات

Email: M.soleymani@scu.ac.ir

چکیده

به منظور بررسی تاثیر طول لوله و همچنین سرعت هوای در حال چرخش بر روی ضریب عملکرد، راندمان سرمایش و دمای هوای خروجی در یک گلخانه مجهز به سامانه زمین‌گرمایی در اراک، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل‌تصادفی با دو عامل طول لوله در سه سطح (۱۷، ۳٤ و ۵۲ متر) و سرعت هوا در دو سطح (۵ و ۱۰ متر بر ثانیه)، در سه تکرار انجام شد. انتقال هوا از طریق لوله پی‌وی‌سی به قطر ۲۰ سانتی‌متر که در عمق سه متری نصب شده بود، انجام می‌شد و نوع چرخش هوا از نوع حلقه‌باز بود. شاخص‌های آزمایش در محدوده ساعات گرم روز و به مدت یک هفته در اواخر تیر اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش نشان داد بهترین عملکرد سامانه از نظر مقدار کاهش دمای خروجی و شاخص‌های راندمان و ضریب عملکرد، در طول لوله ۳٤ متر و سرعت هوای ۱۰ متر بر ثانیه به دست آمد. دمای خروجی دمنده، راندمان و ضریب عملکرد در این حالت به ترتیب C °۲۵/۷، ۰/٦۹ و ۳/۲ به‌دست آمد. شاخص‌های عملکردی در دو طول لوله ۵۲ متر و ۳٤ متر مشابه بودند. در دو سرعت آزمون شده، اختلاف معنی‌داری بین شاخص‌های اندازه‌گیری شده مشاهده نشد. با این حال با طول لوله۱۷ متر، بیشترین شاخص‌های عملکردی سامانه در سرعت هوای پنج متربرثانیه مشاهده شد. شاخص‌های عملکردی سامانه در این طول در سرعت پنج متربرثانیه به ترتیبC °۲۷، ۰/۵٤ و ۱/۷ و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب C °۳۰، ۰/۳٤ و۲/۱ بود. در صورتی که طول لوله زیاد باشد (بالای ۳٤ متر) پیشنهاد می‌شود جهت افزایش توان سرمایشی تولیدشده (ضریب عملکرد سامانه) سرعت هوای دمنده بر روی ۱۰ متربرثانیه تنظیم شود. تغییرات روند ۲٤ ساعته نشان داد بیشترین شاخص‌های عملکردی سامانه، در ساعات گرم روز اتفاق می‌افتد و استفاده از این سامانه در ساعات خنک توصیه نمی‌شود.

مقدمه

در حال حاضر تولید انرژی و اقتصاد انرژی وابستگی شدیدی به منابع فسیلی مثل نفت، گاز و زغال‌سنگ دارد. استفاده از این نوع انرژی‌ها در دهه‌های اخیر، موجب آلودگی‌های زیست‌محیطی زیادی شده است (۱۵). لذا ضروری است برای استفاده از سایر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد و یا زمین‌گرمایی برنامه‌ریزی شود. انرژی زمین‌گرمایی یکی از انواع انرژی‌های پایدار در طبیعت می‌باشد. براساس مطالعات انجام‌شده، پتانسیل بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی در اعماق زمین در ۱۰ نقطه ایران وجود دارد و در رتبه‌بندی جهانی، ایران در گروه کشورهایی است که امکان تولید برق از این نوع انرژی را دارا می‌باشد (۲۱). از طرفی، گرمای موجود در لایه‌های سطحی زمین نیز که در کل پوسته زمین موجود است، به‌راحتی قابل استخراج می‌باشد (۲۳). دمای خاک در عمق ۳ تا ۵ متری از سطح زمین در طی یک فصل تقریبا ثابت می‌باشد (۲). به واسطه وجود اختلاف دمای محیط و عمق لایه‌های سطحی زمین، می‌توان از انرژی ذخیره‌شده موجود در زمین برای گرمایش و سرمایش محیط‌های مسکونی و کشاورزی استفاده نمود (۱۴). در فصل زمستان، با توجه به این که دمای عمقی زمین بیشتر از دمای محیط می‌باشد، از انرژی زمین‌گرمایی برای گرمایش محیط استفاده می‌شود. بر عکس، در فصل تابستان، استفاده از این سامانه، برای سرمایش محیط امکان‌پذیر می‌باشد.

یکی از روش‌های انتقال انرژی موجود در قسمت عمقی زمین، استفاده از سیال هوا می‌باشد. در این روش، هوای محیط توسط یک دمنده برقی به چرخش در می‌آید. به این نوع سامانه اصطلاحا مبدل حرارتی هوا-زمین[1] اطلاق می‌شود. چرخش هوا در سامانه زمین‌گرمایی به دو صورت حلقه‌باز[2] و حلقه‌بسته[3] می‌باشد (۴). در الگوی حلقه‌باز، هوای بیرون از طریق یک دمنده به داخل گلخانه هدایت می‌شود. در الگوی حلقه‌بسته، هوای داخل گلخانه، پس از چرخش درون لوله‌های مبدل حرارتی، به عنوان حامل انرژی، مجددا وارد گلخانه می‌شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده، عمق بهینه قراردهی لوله انتقال هوا در زمین در حدود ۲/۵ الی ۳ متر می‌باشد (۹ و ۱۴). بر اساس نتایج تحقیقات ناظرنژاد و همکاران[4] (۱۷)عمق بهینه سامانه زمین‌گرمایی در شهر تهران در حدود سه متر می‌باشد. طول لوله انتقال هوا نیز ۳۰ الی ۵۰ متر توصیه شده است (۴). مقدار انتقال گرما و دمای خروجی دمنده به چندین عامل بستگی دارد. مهمترین عوامل موثر در کارآیی سامانه زمین‌گرمایی عبارتند از: طول و قطر لوله، عمق قراردهی لوله از سطح زمین، سرعت هوا و نوع بافت خاک (۷). جنس لوله اثر محسوسی بر عملکرد سامانه زمین‌گرمایی ندارد (۶). طول لوله انتقال هوا یکی از فاکتورهای موثر بر شاخص‌های کارآیی سامانه زمین‌گرمایی می‌باشد (۸). بر اساس نتایج محققین از نقطه‌نظر کارآیی سامانه، بهترین اندازه قطر لوله، ۱۰ الی ۳۰ سانتی‌متر و مناسب‌ترین عمق قراردهی لوله، ۳ متر می‌باشد (۱۰). هر چه میزان عمق قراردهی لوله انتقال هوا بیشتر باشد، دمای هوای خروجی از لوله عمقی زمین در فصل گرما کمتر است. با این حال، افزایش هزینه حفاری، مانع از اجرای این سامانه در عمق زیاد خاک می‌شود (۱۱). لی[5] و استراند[6] (۱۲) با مدل‌سازی سامانه سرمایشی به این نتیجه رسیدند که با کاهش سرعت هوا از ۱۰ به پنج درجه سلسیوس، دمای هوای خروجی در فصل گرم در حدود سه الی پنج درجه سلسیوس کاهش می‌یابد که در نتیجه ضریب عملکرد و راندمان سامانه افزایش می‌یابد و دلیل آن را افزایش مدت‌زمان تماس هوا با جداره داخلی لوله بیان کرده‌اند. مشابه چنین نتایجی توسط ناظرنژاد و همکاران (۱۷) به‌دست آمده است. با این حال سرعت هوا

1- Earth to Air Heat Exchanger
2- Open Loop
3- Closed Loop
4- Nazer-Nejad
5- Lee
6- Strand

باید به اندازه‌ای باشد که توان سرمایشی کافی را تولید نماید (۲۳). بر اساس نتایج پژوهش‌هایی که در ایالت پنجاب هند (آب و هوای گرم) انجام شده، طول بهینه لوله انتقال هوا در حدود ۳۰ متر می‌باشد. در این آزمایش مقدار کاهش دمای هوای خروجی دمنده در سرعت‌های ۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه به ترتیب در حدود ۴ و ۷ درجه سلسیوس گزارش شده است (۲۰). عملکرد یک سامانه زمین‌گرمایی واقع در منطقه‌ای گرم در کشور الجزایر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورتی که سرعت هوای داخل لوله ۲/۵ متر بر ثانیه باشد، طول بهینه لوله در حدود ۲۰ متر می‌باشد (۹). محققین پاکستانی با استفاده از روش آر اس ام[1] تاثیر سه عامل طول و قطر لوله و سرعت هوای داخل لوله را بر عملکرد سامانه زمین‌گرمایی برای یک محیط مسکونی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بهترین شاخص‌های عملکردی سامانه در طول۵۰ الی ۷۰ متر، قطر ۱۸–۲۵ سانتی‌متر و سرعت ۵ الی۷ متر بر ثانیه به دست می‌آید (۳). محققین هندی اظهار داشته‌اند در صورتی که طول لوله کم باشد اختلاف دمای محیط بیرون و هوای خروجی دمنده در حدود ۵ تا ۶ درجه سلسیوس می‌باشد (۲۲). بر اساس نتایج تحقیقات انجام‌شده توسط دربل[2] و کانون[3] (۸)، افزایش طول لوله انتقال هوا باعث افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه می‌شود. با این حال از یک طول مشخصی به بعد، توازن انتقال گرما بین هوای داخل لوله و محیط خاک بر قرار می‌شود. به بیان دیگر با افزایش بیشتر طول لوله از یک مقدار مشخص به بعد، هیچ گونه تغییری در دمای هوای خروجی لوله انجام نمی‌شود. به این طول اصطلاحا طول اشباع می‌گویند(۳). هر چه مقدار دبی هوا بیشتر باشد، طول لوله اشباع نیز بیشتر می‌شود (۳). ساینیو همکاران[4] (۱۸)، تاثیر سه سطح سرعت سه، چهار و پنج متر بر ثانیه بر روی عملکرد سامانه زمین‌گرمایی در سرمایش محیط مسکونی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین راندمان سامانه در سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه به‌دست می‌آید. این محققین علت این موضوع را افزایش عدد رینولدز عنوان کرده‌اند که پیامد آن، افزایش ضریب انتقال جابجایی هوا می‌باشد. تیواری و همکاران[5] (۲۲) اثرات قطر و طول انتقال هوا را بر مقدار توان تولید شده سامانه گرمایی و دمای خروجی آن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد در هر دو قطر لوله ۱۰ و ۵ سانتی‌متر، طول لوله اشباع در حدود ۳۰ متر می‌باشد و با افزایش مقدار دبی هوا، طول اشباع افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج تحقیقاتی که در یک منطقه بیابانی در کشور الجزایر انجام شد، اثر سرعت هوا بر دمای خروجی دمنده در طول لوله ۲۰ متر معنی‌دار می‌باشد. با افزایش طول لوله به ۳۵ متر، اثر سرعت بر دمای هوای خروجی دمنده بدون‌تاثیر گزارش شده‌است (۹). دلیل این موضوع این است که با افزایش طول لوله، سطح تماس سطح داخلی لوله و هوا افزایش می‌یابد، در نتیجه مدت‌زمان تماس هوا و سطح لوله افزایش می‌یابد. در خصوص موضوع تاثیر سرعت هوا بر عملکرد سامانه ضروری است عامل طول نیز در نظر گرفته شود ودر کل اثر هر دو عامل تواما مورد بررسی قرار گیرد. هدف از اجرای این آزمایش، بررسی اثر طول لوله و سرعت هوا و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر روی شاخص‌های عملکردی سامانه زمین‌گرمایی می‌باشد. همچنین تغییرات ساعتی شاخص‌های عملکردی سامانه در ترکیب تیمارها در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته، از دیگر اهداف انجام این آزمایش بوده است.

1- Response Surface Method (RSM)
2- Derbel
3- Kanoun
4- Saini
5- Tiwari

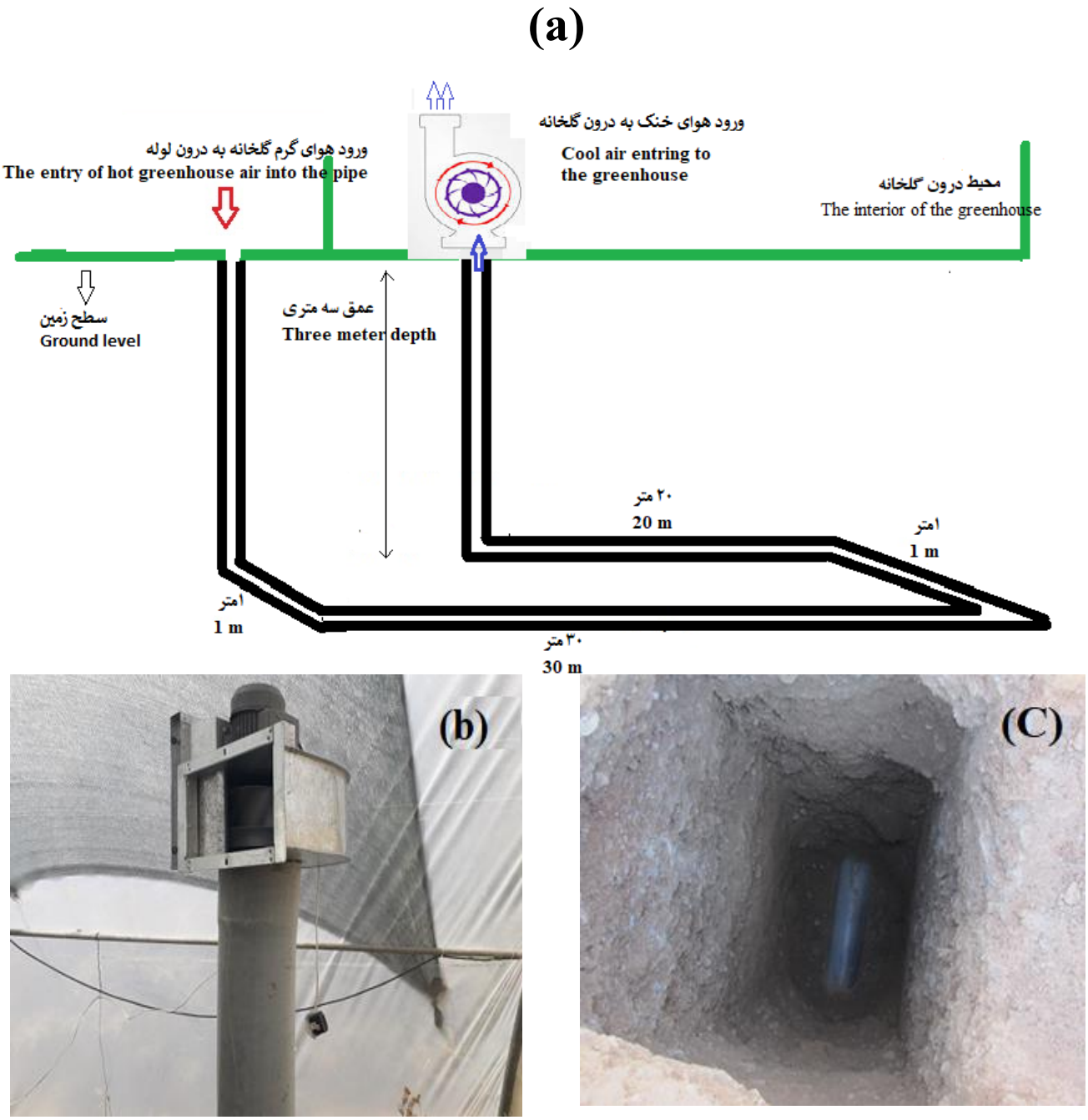
مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی مجهز به تجهیزات زمین‌گرمایی در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی واقع در شهر اراک اجرا گردید. شهر اراک در استان مرکزی با ارتفاع ۱۷۰۸ متر از سطح دریا و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و۵ دقیقه شمالی قرار دارد. میانگین دمای شهر اراک ۱۳/۸ درجه سلسیوس که مرداد با میانگین ۲۷ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه و بهمن با ۰/۳درجه سلسیوس، سردترین ماه سال است. بافت خاک محل آزمایش شنی-لومی بود (درصد رس، سیلت و شن به ترتیب برابر با ۱۹، ۲۵ و۵۶ بود). برای چرخش هوا، یک دستگاه دمنده گریزازمرکز با توان ۷۶۰ وات استفاده شد (شکل۱-b).

در این گلخانه، لوله انتقال هوا از جنس پی‌وی‌سی به طول تقریبی ۵۲ و قطر ۰/۲ متر بود که به صورت حلقوی در بیرون از گلخانه در عمق سه متری زمین نصب شده بود. نحوه چرخش هوا به صورت حلقه باز بود. به این صورت که هوای بیرون گلخانه به واسطه مکش دمنده گریز از مرکز (با توان ۷۶۰ وات، ساخت شرکت آراز الکتریک موتور)و ، به داخل لوله کشیده می‌شد و در طول لوله به جریان در می‌آمد و در نهایت هوای خروجی وارد محیط گلخانه می‌شد (شکل۱-a). در فواصل ۱۷ و ۳۴ متری از محل ورودی هوا، دو چاهک به عمق ۳ متر حفر شد. با ایجاد یک حفره بر روی لوله و اتصال آن به یک لوله عمودی به قطر ۱۰ سانتی‌متر، امکان قراردهی دیتالاگر از سطح خاک ایجاد شد (شکل۱-c). یک لوله سه‌متری دیگر در یکی از چاهک‌ها و در مجاورت لوله اصلی هوا قرار داده شد تا بتوان با قراردادن دیتالاگر در محیط خاک، دمای خاک را اندازه‌گیری نمود. در هر سه لوله، با استفاده از سیم فلزی، یک دستگاه دیتالاگر در داخل لوله (در مسیر جریان هوا) و یک دستگاه در محیط خاک قرار گرفت. داخل هر لوله عمودی حد فاصل بین دیتالاگر تا سطح زمین، با استفاده از پلاستیک‌های حباب‌دار کاملا عایق‌بندی شد. در واقع دمای هوا در فواصل مذکور، نشان‌دهنده دمای هوای خروجی دمنده در دو حالت سامانه با طول لوله انتقال هوای ۱۷ و ۳۴ متر است. برای اندازه‌گیری دمای هوا در سطح طول ۵۲ متر، یک دستگاه سنسور و دیتالاگر نصب شد.

مشخصات گلخانه آزمایشی در جدول ۱ آورده شده است. رطوبت خاک در عمق سه‌متری زمین، در تاریخ ششم جولای ۲۰۲۲ (۱۶ تیر ۱۴۰۱) با استفاده از روش وزنی اندازه‌گیری شد که در محدوده ۱۱-۹ درصد بود. دمای محیط بیرون (دمای ورودی) و دمای هوای داخل لوله در هر سه سطح طول لوله، در هر ۱۰ دقیقه ثبت می‌شد. مشخصات دیتالاگر استفاده‌شده در جدول ۲ آورده شده است.

با تغییر ولتاژ (با استفاده از یک دیمر عمومی) و تغییر دور الکتروموتور، تنظیم سرعت هوا امکان‌پذیر بود. برای اندازه‌گیری سرعت هوا، از یک دستگاه سرعت‌سنج هوا، ساخت شرکت AZ مدل ۸۹۰۲ ساخت کشور چین استفاده گردید. داده‌های ذخیره‌شده از طریق نرم‌افزار مخصوص دیتالاگر، به محیط اکسل منتقل شد. دمای هوای ورودی دمنده، دمای خاک و دمای هوای خروجی دمنده، در فواصل ۱۷، ۳۴ و ۵۲ متری در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد. برای بررسی اثر سرعت هوا و طول لوله و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر روی شاخص‌های عملکردی سامانه در طول ساعات گرم روز، یک آزمایش چندعامله به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل‌تصادفی با دو عامل طول لوله در سه سطح (۱۷، ۳۴ و ۵۲ متر) و سرعت هوا در دو سطح (۵ و۱۰ متر بر ثانیه) در سه تکرار در اواسط جولای ۲۰۲۰ (اواخر تیر) و به مدت یک‌هفته انجام شد. اندازه‌های لوله ۱۷، ۳۴ و ۵۲ متر به عنوان فاکتور اول و دو سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. میانگین دمای گرم‌ترین ساعات روز(بین ساعات ۱۲ تا ۱۸) به عنوان دمای ورودی سامانه در نظرگرفته‌شد. شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده عبارت بودند از: دمای هوا، راندمان و ضریب عملکرد سامانه.



شکل(۱) طرح‌واره نحوه چرخش هوا(a)، دمنده هوا(b) وحفر چاهک جهت قراردهی دیتالاگر(c)

Figure (1) Schematic view of air circulation(a), Air centrifugal blower (b) and a manifold digged for datalogger instalation (C)

جدول(۱) مشخصات گلخانه آزمایشی
Table (1) The used greenhouse specification

مقدار یا نوع Type or amount	ویژگی Property
150	مساحت (m^2) Area (m^2)
15	طول (m) Length (m)
10	عرض(m) Width (m)
3.5	ارتفاع(m) Height (m)
شرقی- غربی West-East	جهت گلخانه Greenhouse orientation
پلاستیک تک لایه Single layer polyethylene	پوشش گلخانه Greenhouse covering
تونلی‌قوسی Quonset	نوع گلخانه Greenhouse type

جدول(۲) خصوصیات فنی دیتالاگر
Table (2) Data logger technical specifications

مقدار یا نوع Type or amount	ویژگی Property
چین China	کشور سازنده Country of manufacture
Gm1365	مدل Model
0.3°C	دقت اندازه‌گیری دما Temperature measuring accuracy
-30°C - 80°C	محدوده اندازه‌گیری دما Temperature measuring range
32000 Data	ظرفیت حافظه Memory capacity

راندمان سامانه حرارتی

راندمان سامانه زمین‌گرمایی بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (۱۹).

$$\eta_{ETAHE} = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{soil} - T_{in}} \quad (۱)$$

که در آن:

η_{ETAHE} راندمان سامانه زمین‌گرمایی (٪)

T_{out} دمای هوای خروجی دمنده (°C)

T_{iin} دمای هوای ورودی دمنده که در واقع دمای محیط است (°C)

T_{soil} دمای خاک (°C)

ضریب عملکرد سامانه

ضریب عملکرد سامانه با استفاده از رابطه (۲) به‌دست آمد (۱۸).

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (۲)$$

که در آن:

C_{OP}	ضریب عملکرد سامانه (بدون واحد)
Q_c	توان سرمایشی زمین‌گرمایی(kW)
W	توان مصرفی الکتروموتور برای چرخش دمنده (kW)

توان سرمایشی زمین‌گرمایی

توان تولیدشده با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد (۱۴).

$$Q_c = (\frac{\pi}{4})\rho_a d_1^2 v C_a (T_{out} - T_{in}) \quad (۳)$$

که در آن:

Qc	توان سرمایشی زمین‌گرمایی (kW)
T_{out}	دمای هوای خروجی دمنده (°C)
T_{in}	دمای هوای ورودی دمنده (°C)
C_a	گرمای ویژه هوا (kJ/kg.°C)
V	سرعت هوا (m/s)
d_1	قطر داخلی لوله (m)
ρa	جرم مخصوص هوا (kg/m^3)

تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر روی صفات اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS-15 انجام شد. مقایسه میانگین صفات مذکور به روش آزمون جدول ۴ مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده در سه طول لوله را نشان می‌دهد. کمترین مقادیر شاخص‌ها در طول ۱۷ متر مشاهده می‌شود. اختلاف دمای خروجی راندمان سامانه در دو طول لوله ۳۴ و ۵۲ متر در سطح آماری یک‌درصد معنی‌دار نیست. دلیل این موضوع این است که با افزایش طول لوله انتقال هوا، سطح تماس انتقال حرارت افزایش می‌یابد (۹). اگر طول لوله خیلی کم باشد با توجه به کم‌شدن سطح تماس بین هوا و سطح داخلی لوله، سرعت تبادل حرارت بین هوای در حال حرکت و محیط خاک کم می‌شود و لذا دمای خروجی نیز بالاتر می‌باشد (۹). بعد از یک طول مشخصی از لوله، با توجه به این که دمای هوا و خاک به تعادل رسیده‌اند، عملا هیچ‌گونه تبادل حرارتی بین دو محیط صورت نمی‌گیرد و لذا استفاده از طول بیش از ۳۰ الی۳۴ متر، توجیه‌پذیر نمی‌باشد (۳، ۹ و ۲۲). در واقع طول اشباع در این سامانه در حدود ۳۴ متر است، که با نتایج تیواری و همکاران (۲۲) هم‌خوانی دارد.

نتایج و بحث

داده‌های ثبت‌شده دیتالاگر نصب‌شده در عمق سه‌متر از سطح زمین، نشان داد دمای خاک در عمق مذکور در طول زمان آزمایش برابر ۲۳/۳ درجه سلسیوس، با ضریب تغییرات ۰/۱ بود. جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر طول لوله و سرعت هوا در ساعات گرم روز بر دمای خروجی دمنده، راندمان و ضریب عملکرد سامانه را نشان می‌دهد. اثر طول و سرعت و همچنین اثر متقابل دو عامل بر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده در سطح آماری یک درصد معنی‌دار می‌باشد(۳).

دانکن در سطح آماری یک درصد انجام شد. همچنین روند تغییرات ساعتی شاخص‌های عملکردی سامانه در تیمارهای مختلف با استفاده از نمودارهای نرم‌افزار اکسل موردبررسی قرار گرفت.

جدول ۵، مقایسه میانگین صفات در دو سرعت هوای ۵ و ۱۰ متربرثانیه را نشان می‌دهد. صرف‌نظر از طول لوله انتقال هوا، دمای خروجی هوا در سرعت ۵ متربرثانیه در مقایسه با سرعت ۱۰ متربرثانیه در حدود۲/۵°C درجه خنک‌تر می‌باشد. به دلیل اختلاف بیشتر دمای ورودی و خروجی هوا در سرعت ۵ متربرثانیه، راندمان و ضریب عملکرد سامانه در این سرعت در مقایسه با تیمار سرعت ۱۰ متربرثانیه بیشتر می‌باشد. نتایج پژوهش‌های محققین دیگر نیز نشان می‌دهد هر چقدر سرعت انتقال هوا کم‌تر باشد به دلیل افزایش مدت زمان سطح تماس هوا و سطح داخلی لوله، تبادل حرارتی بین دو محیط هوا افزایش می‌یابد. در نتیجه، درصد کاهش دمای خروجی در مقایسه با سرعت‌های بالاتر، بیشتر می‌باشد (۱۰).

جدول(۳) نتایج تجزیه‌واریانس اثر طول لوله و سرعت هوا بر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده

Table(3) Results of the Analysis of Variance (ANOVA) of the effects of tube length and, air velocity in the measured responses

منابع تغییرات (S.O.V)	درجه آزادی (D.F)	میانگین مربعات(MS)		
		ضریب عملکرد Coefficient of performance	راندمان (٪) Efficiency (%)	دمای هوای خروجی (°C) Outlet air temperature (°C)
بلوک Block	2	0.09^{ns}	0.001^{ns}	0.061^{ns}
طول لوله هوا Air tube length (m)	2	4.3^{**}	0.174^{**}	21.7^{**}
سرعت هوا Air velocity (m/s)	1	10.5^{**}	0.071^{**}	12^{**}
طول لوله × سرعت هوا Tube length × Air velocity	2	1.3^{**}	0.007^{**}	1.2^{**}
خطا Error	10	0.052	0.001	0.048
ضریب تغییرات(٪) C.V		7.8	4.4	0.83

**و :ns به ترتیب اختلاف معنی‌دار و غیرمعنی‌دار در سطح آماری ۱%

**: Significant at 1% probability level
ns: non-significant

جدول(٤) مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده در سه سطح فاکتور طول لوله

Table (4) Mean comparison of measured responses at the three levels of pipe length

طول لوله جریان هوا (m) Length of air transferring pipe (m)	ضریب عملکرد Coefficient of performance	راندمان (٪) Efficiency (%)	دمای هوای خروجی (°C) Outlet air temperature (°C)
17	1.9^{a}	0.44^{a}	28.5^{a}
34	3.2^{b}	0.69^{b}	25.7^{b}
52	3.5^{b}	0.69^{b}	25.3^{b}

حروف مختلف در هر ستون بیانگر این است که بر اساس آزمون دانکن بین صفات اندازه‌گیری شده در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد

Different letters at each column shows a significant difference among measured traits on basis of Dunken test ($P<0.01$)

جدول ۶ و شکل ۲ مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده در سه طول لوله و دو سرعت هوا را نشان می‌دهد. در تیماری که طول لوله انتقال هوا ۱۷ متر است، مقدار دمای خروجی هوا در دو سرعت ۱۰ و ۵ متربرثانیه به ترتیب ۲۹/۹ و ۲۷ درجه سلسیوس می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت هوا، دمای خروجی دمنده در حدود سه درجه سلسیوس کاهش می‌یابد(شکل۲). شاخص راندمان و ضریب عملکرد در دو سرعت آزمایش، به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۵۴، ۲/۱ و ۱/۷ می‌باشد. این نتیجه با نتایج مطالعات محققین دیگر هم‌خوانی دارد (۷، ۲۳، ۵ و ۱). بنابراین در صورتی که طول لوله ۱۷ متر باشد، سرعت هوای ۵ متربرثانیه در مقایسه با سرعت دیگر، دو شاخص مذکور را افزایش می‌دهد. در مواردی که دمای مطلوب محیط ۲۸ تا ۲۹ درجه سلسیوس باشد، پیشنهاد می‌شود طول لوله انتقال هوا ۱۷ متر در نظر گرفته شود. در این حالت سرعت

هوای درون لوله ۵ متربرثانیه توصیه می‌شود. در تیمار با طول ۳۴ متر، دمای هوای خروجی در دو سطح سرعت۱۰ و ۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۲۵/۳ و ۲۶/۱ درجه سلسیوس می‌باشد. از نظر آماری، بین این دو مقدار در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود، طول اشباع در سرعت ۵ متربرثانیه در حدود ۳۴ متر است در حالی که با توجه به شکل۲، طول اشباع در سرعت ۱۰ متربرثانیه در فاصله بیشتر از ۳۴ متر اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر با افزایش دبی هوا، طول اشباع لوله(طولی که بعد از آن، دمای هوا ثابت باقی می‌ماند) نیز افزایش می‌یابد (۳ و ۵).

در طول ۵۴ متر دمای هوای خروجی در دو سرعت آزمایش تقریبا یکی می‌باشد (شکل۲). افزایش طول لوله در این تیمار باعث افزایش سطح تماس هوا و دیواره داخلی لوله (محیط خاک) می‌شود. در نتیجه، دمای بین محیط خاک و هوا تا قبل از خروج هوا، به تعادل می‌رسد. به همین دلیل افزایش سرعت تاثیری بر روی دمای خروجی ندارد. بنابراین دمای هوای خروجی و راندمان در هر دو سطح سرعت تقریبا یکسان می‌باشد. متوسط دمای خروجی (میانگین دو سرعت) در دو طول ۵۲ و ۳۴ متر تقریبا به یک اندازه است (به ترتیب ۲۵/۳ و ۲۵/۵ درجه سلسیوس). میانگین راندمان در دو طول مذکور به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۶ می‌باشد. متوسط ضریب عملکرد در طول های ۳۴ و ۵۲ متر در دو سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۲/۵ و۴/۱ به دست آمده است. به عبارتی در هر دو طول لوله(۳۴ و ۵۴ متر)، ضریب عملکرد (ودر نتیجه توان سرمایشی) در سرعت هوای ۱۰ متر بر ثانیه نسبت به سرعت دیگر، در حدود ۹۰ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین برای جلوگیری از افزایش هزینه حفاری و خرید لوله اضافی، می‌توان نتیجه‌گیری نمود بهترین تیمار از نقطه‌نظر شاخص‌های عملکردی، طول لوله ۳۴ متر با سرعت هوای ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

شکل ۳ تغییرات ساعتی دمای خروجی دمنده و راندمان را در سه سطح طول لوله در دو سرعت آزمایش در یک بازه ۲۴ساعته نشان می‌دهد. این مقادیر میانگین داده‌های اندازه‌گیری‌شده در ساعات مختلف، در اواسط جولای ۲۰۲۲ (اواخر تیر ماه) را نشان می‌دهد. روند تاثیر تغییرات سرعت بر روی دما و راندمان در طول لوله ۱۷ متر در مقایسه با دو طول دیگر آزمایش مشهودتر می‌باشد. در ساعات شب و اوایل صبح دمای محیط تقریبا برابر دمای خاک و یا کمتر از آن می‌شود که در نتیجه آن، سامانه در حالت گرمایشی قرار می‌گیرد. همچنین به علت این‌که اختلاف دمای محیط و دمای هوای خروجی به حداقل می‌رسد، ضریب عملکرد و راندمان در فاصله زمانی ساعات خنک، کاهش می‌یابد (۸). در نتیجه در هر سه سطح طول آزمایش، استفاده از این سامانه به دلیل پایین‌بودن راندمان و ضریب عملکرد توصیه نمی‌شود.

جدول(۵) مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده در دو سطح فاکتور سرعت

Table (5) Mean comparison of measured indices for the air velocities of 5 and 10 (m/s)

سرعت هوا (m/s) Air velocity (m/s)	ضریب عملکرد Coefficient of performance	راندمان Efficiency	دمای هوای خروجی (°C) Outlet air temperature (°C)
5	2.2a	0.66a	28.5a
10	3.4b	0.56b	27.1b

حروف مختلف در هر ستون بیانگر این است که بر اساس آزمون دانکن بین شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد

Different letters at each column shows a significant difference among measured responses (P<0.01)

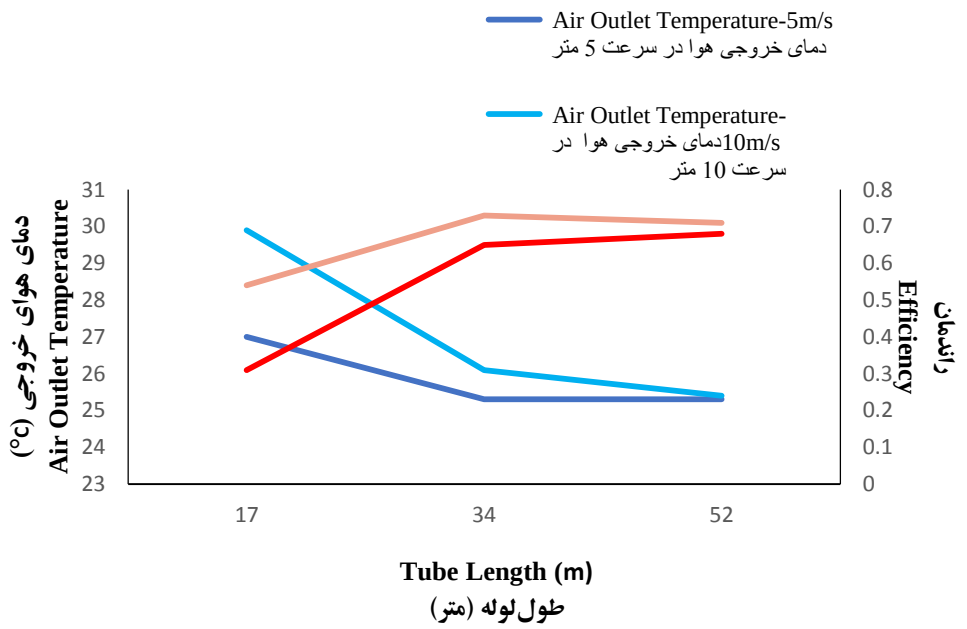
جدول(٦) مقایسه میانگین اثر مقابل طول لوله و سرعت هوا بر روی شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده

Table (6) Mean comparison of interaction effects of pipe length and air velocity on measured indices

طول لوله انتقال هوا (m) Length of air transferring pipe (m)	سرعت هوا (m/s) Air velocity (m/s)	ضریب عملکرد Coefficient of performance	راندمان Efficiency	دمای هوای خروجی(°C) Outlet air temperature (°C)
17	5	1.7b	0.54c	27b
	10	2.1b	0.34d	29.9a
34	5	2.6b	0.73a	25.3c
	10	3.7a	0.65ab	26.1c
52	5	2.4b	0.71a	25.3c
	10	4.4a	0.68ab	25.4c

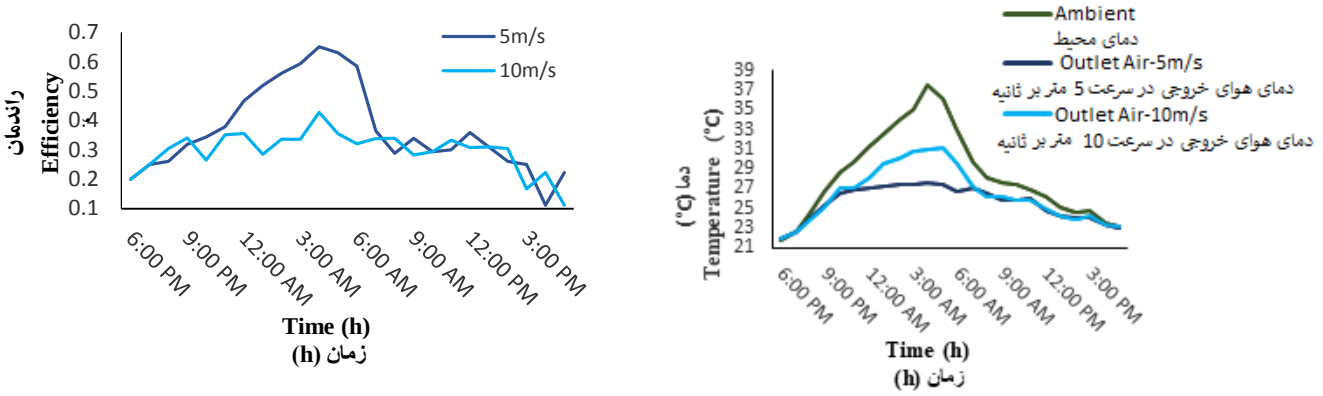
حروف مختلف در هر ستون بیانگر این است که بر اساس آزمون دانکن بین صفات اندازه‌گیری شده در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد

Different letters at each column shows a significant difference for measured responses (P<0.01)



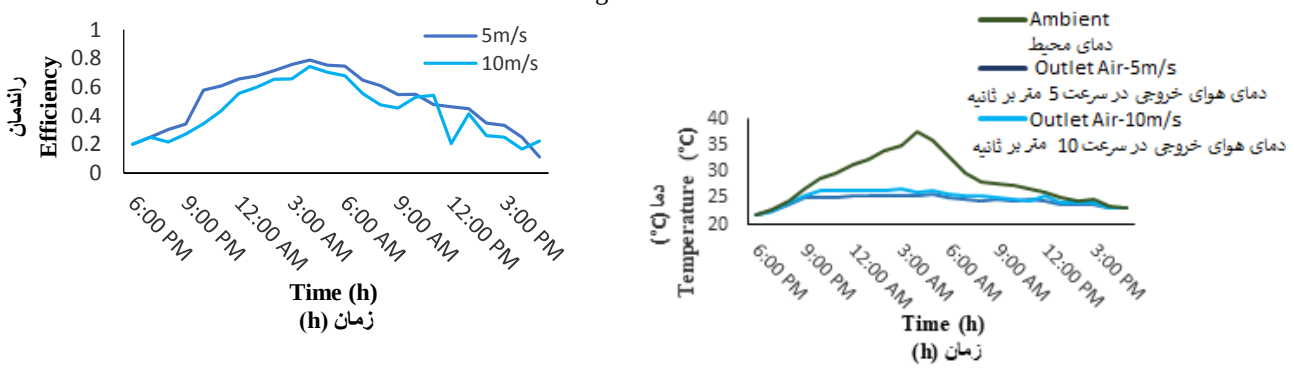
شکل(۲) اثر طول لوله بر روی دمای هوای خروجی و راندمان در دو سرعت ۱۰ و ۵ متربرثانیه

Figure(2) Effect of pipe length on outlet air temperature and efficiency at air velocities of 10 and 5 m/s



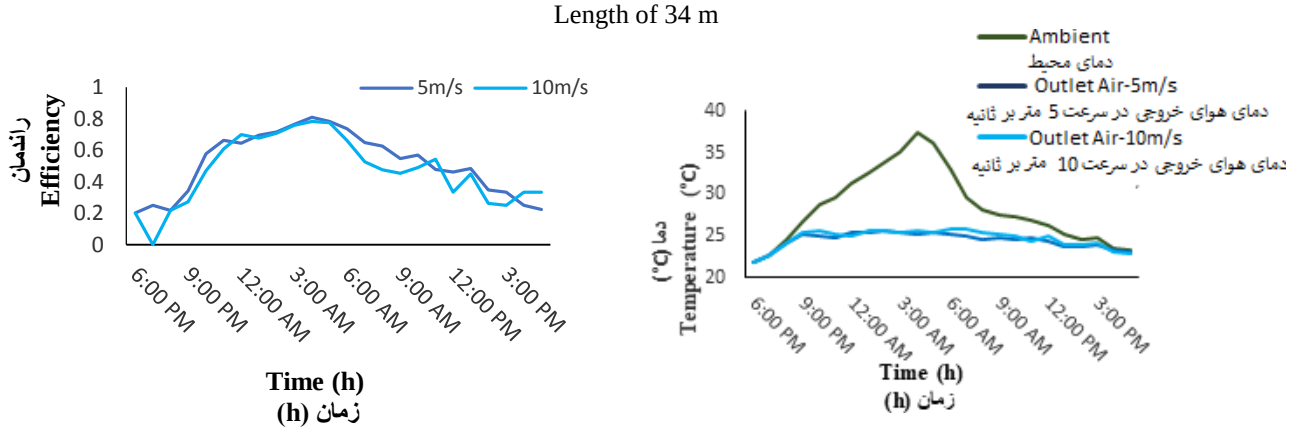
طول ۱۷ متر

Length of 17 m



طول ۳۴ متر

Length of 34 m



طول ۵۲ متر

Length of 52 m

شکل(۳) تغییرات ساعتی دمای خروجی هوا و راندمان سامانه در دو سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه در سه سطح طول

Figure (3) Hourly variation of the outlet air temperature and efficiency at velocities of 5 and 10m/s at three pipe length

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد در صورتی که طول لوله انتقال هوا ۳۴ و ۵۲ متر باشد، سرعت هوا تاثیر معنی‌داری بر روی هوای خروجی و شاخص راندمان ندارد. متوسط دمای خروجی در در دو طول ۵۲ و ۳۴ متربه ترتیب ۲۵/۳ و ۲۵/۵ درجه سلسیوس می‌باشد. میانگین راندمان در دو طول مذکور تقریبا یکسان می‌باشد (به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۶) با این حال با توجه به این‌که مقدار توان تولیدشده، بستگی به سرعت هوا دارد، بهتر است سرعت هوا ۱۰ متربرثانیه باشد. با استفاده از رابطه ضریب عملکرد(رابطه دو)، مقدار توان سرمایشی تولید شده در دو طول ۳۴ و ۵۲ متر با دو سرعت هوای ۱۰ و ۵ متربرثانیه به‌ترتیب ۳/۱و ۱/۹ کیلووات می‌باشد. بر این اساس، بهترین عملکرد سامانه از نظر مقدار کاهش دمای خروجی و دو شاخص راندمان و ضریب عملکرد، در شرایطی به دست می‌آید که طول لوله ۳۴ متر و سرعت هوای داخل لوله ۱۰ متربرثانیه باشد. درصورتی که طول لوله انتقال هوا ۱۷ متر باشد، مقدار دمای خروجی هوا در دو سرعت ۱۰ و ۵ متربرثانیه به ترتیب ۲۹/۹ و ۲۷ درجه سلسیوس می‌باشد. راندمان سامانه و مقدار توان تولیدی در دو سرعت آزمایش به ترتیب ۰/۳۴ ، ۰/۵۴، ۱/۵ و ۰/۵ است. بر اساس این نتایج در مواردی که دمای هوای بیش از دمای ۲۵ درجه سلیسوس، مناسب محیط گلخانه باشد، می‌توان طول لوله را ۱۷ متر در نظر گرفت در این حالت جهت جلوگیری از کاهش راندمان سامانه، سرعت هوای درون لوله، ۵ متربرثانیه درنظر گرفته شود.

References

1. Ahmad, S.N. and Prakash, O. 2020. Optimization of Earth Air Tube Heat Exchanger for Cooling Application Using Taguchi Technique. International Journal of Heat and Technology, 38(4)

2. Alam, M.R., Zain, M.F.M., Kaish, A.B.M.A. and Jamil, M. 2015. Underground soil and thermal conductivity materials based heat reduction for energy-efficient building in tropical environment. Indoor and Built Environment, 24(2), pp.185-200.

3. Ali, S., Muhammad, N., Amin, A., Sohaib, M., Basit, A. and Ahmad, T. 2019. Parametric optimization of earth to air heat exchanger using response surface method. Sustainability, 11(11), p.3186.

4. Belatrache, D., Bentouba, S., and Bourouis, M. 2017. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. International journal of hydrogen energy, 42(13), 8898-8904.

5. Benhammou, M. and Draoui, B. 2015. Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, pp.348-355.

6. Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H. and Goel, V. 2018. An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, pp.261-280.

7. Cuny, M., Lapertot, A., Lin, J., Kadoch, B. and Le Metayer, O. 2020. Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different French climates. Renewable Energy, 157, pp.342-352.

8. Derbel, H.B.J. and Kanoun, O. 2010. Investigation of the ground thermal potential in tunisia focused towards heating and cooling applications. Applied thermal engineering, 30(10), pp.1091-1100

9. Kaddour, A., Attia, M.E.H., ARICI, M., Benbelgacem, K. and Driss, Z. 2021. A numerical evaluation on the utilization of earth to air heat exchangers in arid regions Algeria. Journal of Thermal Engineering, 8(4), pp.505-514

10. Kaushal, M., Dhiman, P., Singh, S. and Patel, H. 2015. Finite volume and response surface methodology based performance prediction and optimization of a hybrid earth to air tunnel heat exchanger. Energy and Buildings, 104, pp.25-35.

11. Lattieff, F.A., Atiya, M.A., Lateef, R.A., Dulaimi, A., Jweeg, M.J., Abed, A.M., Mahdi, J.M. and Talebizadehsardari, P. 2022. Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study. Frontiers in Built Environment, 8, p.981946.

12. Lee, K.H. and Strand, R.K. 2008. The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. Energy and Buildings, 40(4), pp.486-494.

13. Li, H., Yu, Y., Niu, F., Shafik, M., and Chen, B. 2014. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney. Renewable Energy, 62, 468-477.

14. Liu, Z., Yu, Z. J., Yang, T., Li, S., El Mankibi, M., Roccamena, L., and Zhang, G. 2019. Designing and evaluating a new earth-to-air heat exchanger system in hot summer and cold winter areas. Energy Procedia, 158, 6087-6092

15. Malekzadeh, M.J., Kiani Deh Kiani., and Sajjadiyeh, M. (2019). The effect of temperature and cow manure on biogas production from sugarcane bagasse. Journal of Agricultural Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, 42(4), 107-118. (in Persian with English abstract).

16. Misra, R., Bansal, V., Agarwal, G. D., Mathur, J., and Aseri, T. 2012. Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger. Energy and Buildings, 49, 531-535.

17. Nazer-Nejad, M., Saffarian, M. R., and Behbahani-Nejad, M. (2018). Investigating the possibility of using the underground tunnel for air-conditioning in Tehran. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, 1-10

18. Saini, D., Sharma, L. M., Agarwal, G. D., and Mishra, R. 2015. A critical analysis of design of earth air tunnel heat exchanger. International journal of advanced research science engineering, 4, 491-498.

19. Sakhri, N., Menni, Y., and Chamkha, A. J. 2022. Heating capacity of an earth to air heat exchanger in arid regions-experimental investigation. Journal of Applied and Computational Mechanics, 8(2), 429-437

20. Singh, B., Asati, A. K., and Kumar, R. 2018. Effect of parameters on Earth Air Heat Exchanger in Hot-dry climate. Research Journal of Engineering and Technology, 9(1), 59-66.

21. Soleymani, M., Khoobbakht, G., and Kiani Deh Kiani, M. (2018). Resources of Renewable Energy. Payame-noor press. (in Persian)

22. Tiwari, G. N., Singh, V., Joshi, P., Deo, A., and Gupta, A. 2014. Design of an earth air heat exchanger (EAHE) for climatic condition of Chennai, India. Open Environmental Sciences, 8(1).

23. Yang, L. H., Huang, B. H., Hsu, C. Y., and Chen, S. L. 2019. Performance analysis of an earth–air heat exchanger integrated into an agricultural irrigation system for a greenhouse environmental temperature-control system. Energy and Buildings, 202, 109381.