

Research Article

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

ISSN (E): 2588-526X

ISSN (P): 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. Hedayatipoor¹, M. Soleymani^{2,*} and M. Kiani Deh Kiani³

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 June 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



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*

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

ابوالفضل هدایتی پور^۱، محسن سلیمانی^{۲*} و مصطفی کیانی ده کیانی^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	چکیده
دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵	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 زمین گرمایی در اراک، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل طول لوله در سه سطح (۱۷، ۳۴ 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 ۳۴ متر و سرعت هوای ۱۰ متر بر ثانیه به دست آمد. دمای خروجی دمده، راندمان و ضریب عملکرد در این حالت به ترتیب $25/7^{\circ}\text{C}$ و $0/69$ و $3/2$ به دست آمد. شاخص‌های عملکردی در دو طول لوله ۵۲ متر و ۳۴ متر مشابه بودند. در دو سرعت آزمون شده، اختلاف معنی‌داری بین شاخص‌های اندازه‌گیری شده مشاهده نشد. با این حال با طول لوله ۱۷ متر، بیشترین شاخص‌های عملکردی سامانه در سرعت هوای پنج متر بر ثانیه مشاهده شد. شاخص‌های عملکردی سامانه در این طول در سرعت پنج متر بر ثانیه به ترتیب 27°C ، $0/54$ و $1/7$ و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب 30°C ، $0/34$ و $2/1$ بود. در صورتی که طول لوله زیاد باشد (بالای ۳۴ متر) پیشنهاد می‌شود جهت افزایش توان سرمایشی تولیدشده (ضریب عملکرد سامانه) سرعت هوای دمده بر روی ۱۰ متر بر ثانیه تنظیم شود. تغییرات روند ۲۴ ساعته نشان داد بیشترین شاخص‌های عملکردی سامانه، در ساعات گرم روز اتفاق می‌افتد و استفاده از این سامانه در ساعات خنک توصیه نمی‌شود.
کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، مهندسی پایداری، ضریب عملکرد، راندمان، پمپ زمین گرمایی، عملکرد سامانه	
* عهده دار مکاتبات	
Email: M.soleymani@scu.ac.ir	

مقدمه

در حال حاضر تولید انرژی و اقتصاد انرژی وابستگی شدیدی به منابع فسیلی مثل نفت، گاز و زغال سنگ 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 زمین گرمایی برنامه‌ریزی شود. انرژی زمین گرمایی یکی از انواع انرژی‌های پایدار در طبیعت می‌باشد. براساس مطالعات انجام‌شده، پتانسیل بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی 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، به راحتی قابل استخراج می‌باشد (۲۳). دمای خاک در عمق ۳ تا ۵ متری از سطح زمین در طی یک فصل تقریباً 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 زمین گرمایی 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 اصطلاحاً مبدل حرارتی هوا-زمین^۱ اطلاق می‌شود. چرخش هوا در سامانه زمین گرمایی به دو صورت حلقه‌باز^۲ و حلقه‌بسته^۳ 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، مجدداً وارد گلخانه می‌شود. با توجه به مطالعات انجام‌شده، عمق بهینه قراردادی لوله انتقال هوا در زمین در حدود ۲/۵ الی ۳ متر می‌باشد (۹ و ۱۴). بر اساس نتایج تحقیقات ناظر نژاد و همکاران^۴ (۱۷) عمق بهینه سامانه زمین گرمایی 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 کارایی سامانه زمین گرمایی عبارتند از: طول و قطر لوله، عمق قراردادی لوله از سطح زمین، سرعت هوا و نوع بافت خاک (۷). جنس لوله اثر محسوسی بر عملکرد سامانه زمین گرمایی ندارد (۶). طول لوله انتقال هوا یکی از فاکتورهای موثر بر شاخص‌های کارایی سامانه زمین گرمایی می‌باشد (۸). بر اساس نتایج محققین از نقطه‌نظر کارایی سامانه، بهترین اندازه قطر لوله، ۱۰ الی ۳۰ سانتی‌متر و مناسب‌ترین عمق قراردادی لوله، ۳ متر می‌باشد (۱۰). هر چه میزان عمق قراردادی 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^۵ و استراند^۶ (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 ناظر نژاد و همکاران (۱۷) به دست آمده است. با این حال سرعت هوا

4- Nazer-Nejad

5- Lee

6- Strand

1- Earth to Air Heat Exchanger

2- Open Loop

3- Closed Loop

متر بر ثانیه بر روی عملکرد سامانه زمین گرمایی در سرمایش محیط مسکونی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین راندمان سامانه در سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه به دست می آید. این محققین علت این موضوع را افزایش عدد رینولدز عنوان کرده اند که پیامد آن، افزایش ضریب انتقال جابجایی هوا می باشد. تیواری و همکاران^۵ (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 سانتی متر، طول لوله اشباع در حدود ۳۰ متر می باشد و با افزایش مقدار دبی هوا، طول اشباع افزایش می یابد. 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 معنی دار می باشد. با افزایش طول لوله به ۳۵ متر، اثر سرعت بر دمای هوای خروجی دمنده بدون تاثیر گزارش شده است (۹). دلیل این موضوع این است که با افزایش طول لوله، سطح تماس سطح داخلی لوله و هوا افزایش می یابد، در نتیجه مدت زمان تماس هوا و سطح لوله افزایش می یابد. در خصوص موضوع تاثیر سرعت هوا بر عملکرد سامانه ضروری است عامل طول نیز در نظر گرفته شود و در 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 شاخص های عملکردی سامانه زمین گرمایی می باشد. همچنین تغییرات ساعتی شاخص های عملکردی سامانه در ترکیب تیمارها در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته، از دیگر اهداف انجام این آزمایش بوده است.

باید به اندازه ای باشد که توان سرمایشی کافی را تولید نماید (۲۳). بر اساس نتایج پژوهش هایی که در ایالت پنجاب هند (آب و هوای گرم) انجام شده، طول بهینه لوله انتقال هوا در حدود ۳۰ متر می باشد. در این آزمایش مقدار کاهش دمای هوای خروجی دمنده در سرعت های ۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه به ترتیب در حدود ۴ و ۷ درجه سلسیوس گزارش شده است (۲۰). عملکرد یک سامانه زمین گرمایی واقع در منطقه ای 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 می باشد (۹). محققین پاکستانی با استفاده از روش آر اس ام^۱ تاثیر سه عامل طول و قطر لوله و سرعت هوای داخل لوله را بر عملکرد سامانه زمین گرمایی برای یک محیط مسکونی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بهترین شاخص های عملکردی سامانه در طول ۵۰ الی ۷۰ متر، قطر ۱۸-۲۵ سانتی متر و سرعت ۵ الی ۷ متر بر ثانیه به دست می آید (۳). محققین هندی اظهار داشته اند در صورتی که طول لوله کم باشد اختلاف دمای محیط بیرون و هوای خروجی دمنده در حدود ۵ تا ۶ درجه سلسیوس می باشد (۲۲). بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده توسط دربل^۲ و کانون^۳ (۸)، افزایش طول لوله انتقال هوا باعث افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه می شود. با این حال از یک طول مشخصی به بعد، توازن انتقال گرما بین هوای داخل لوله و محیط خاک بر قرار می شود. به بیان دیگر با افزایش بیشتر طول لوله از یک مقدار مشخص به بعد، هیچ گونه تغییری در دمای هوای خروجی لوله انجام نمی شود. به این طول اصطلاحاً طول اشباع می گویند (۳). هر چه مقدار دبی هوا بیشتر باشد، طول لوله اشباع نیز بیشتر می شود (۳). ساینو همکاران^۴ (۱۸)، تاثیر سه سطح سرعت سه، چهار و پنج

1- Response Surface Method (RSM)

2- Derbel

3- Kanoun

4- Saini

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه تحقیقاتی مجهز به تجهیزات زمین‌گرایی 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 و ۵ دقیقه شمالی قرار دارد. میانگین دمای شهر اراک ۱۳/۸ درجه سلسیوس که مرداد با میانگین ۲۷ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه و بهمن با ۰/۳ درجه سلسیوس، سردترین ماه سال است. بافت خاک محل آزمایش شنی - لومی بود (درصد رس، سیلت و شن به ترتیب برابر با ۱۹، ۲۵ و ۵۶ بود). برای چرخش هوا، یک دستگاه دمنده گریز از مرکز با توان ۷۶۰ وات استفاده شد (شکل ۱-ب).

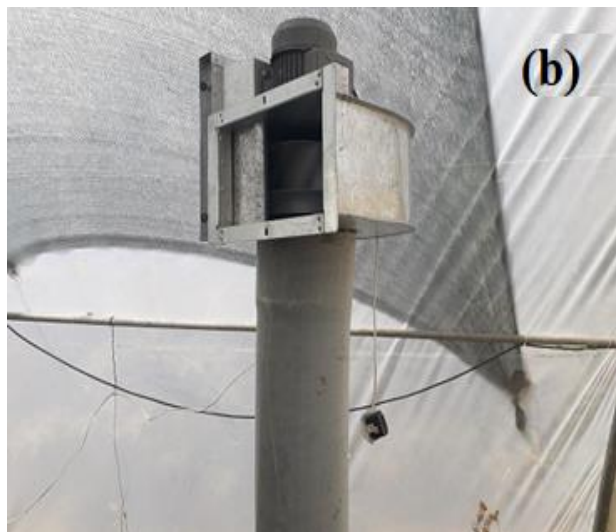
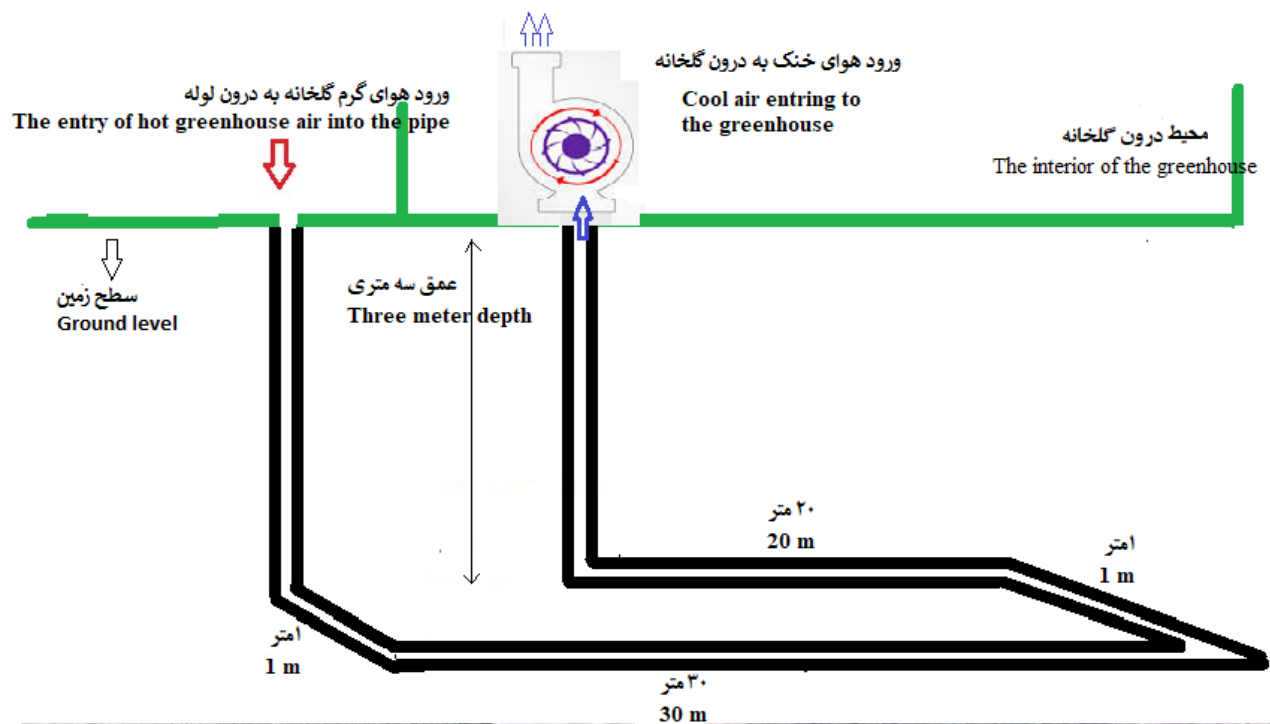
در این گلخانه، لوله انتقال هوا از جنس پی‌وی‌سی به طول تقریبی ۵۲ و قطر ۰/۲ متر بود که به صورت حلقوی در بیرون از گلخانه در عمق سه متری زمین نصب شده بود. نحوه چرخش هوا به صورت حلقه باز بود. به این صورت که هوای بیرون گلخانه به واسطه مکش دمنده گریز از مرکز (با توان ۷۶۰ وات، ساخت شرکت آراز الکتریک موتور) و، به داخل لوله کشیده می‌شد و در طول لوله به جریان در می‌آمد و در نهایت هوای خروجی وارد محیط گلخانه می‌شد (شکل ۱-ا). 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 (شکل ۱-ب). 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 کاملاً 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 ۹-۱۱ 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 کامل تصادفی با دو عامل طول لوله در سه سطح (۱۷، ۳۴ و ۵۲ متر) و سرعت هوا در دو سطح (۵ و ۱۰ 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 نظر گرفته شد. شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده عبارت بودند از: دمای هوا، راندمان و ضریب عملکرد سامانه.

(a)



شکل (۱) طرحواره نحوه چرخش هوا (a)، دمنده هوا (b) و حفر چاهک جهت قراردادی دیتالاگر (c)

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

هدایتی پور و همکاران: بررسی اثر طول لوله و سرعت هوا بر...

جدول (۱) مشخصات گلخانه آزمایشی

Table (1) The used greenhouse specification

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

جدول (۲) خصوصیات فنی دیتالاگر

Table (2) Data logger technical specifications

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

راندمان سامانه حرارتی

راندمان سامانه زمین گرمایی بر اساس رابطه (۱)

محاسبه شد (۱۹).

$$\eta_{ETAHE} = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{soil} - T_{in}} \quad (1)$$

که در آن:

η_{ETAHE} راندمان سامانه زمین گرمایی (%)

T_{out} دمای هوای خروجی دمنده (°C)

ضریب عملکرد سامانه

ضریب عملکرد سامانه با استفاده از رابطه (۲) به دست

آمد (۱۸).

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (2)$$

T_{iin} دمای هوای ورودی دمنده که در واقع دمای محیط

است (°C)

T_{soil} دمای خاک (°C)

که در آن:

C	ضریب عملکرد سامانه (بدون واحد)
OP	
Q _c	توان سرمایشی زمین گرمایی (kW)
W	توان مصرفی الکتروموتور برای چرخش دمنده (kW)

هیچ گونه تبادل حرارتی بین دو محیط صورت نمی گیرد و لذا استفاده از طول بیش از ۳۰ الی ۳۴ متر، توجیه پذیر نمی باشد (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

داده های ثبت شده دیتالاگر نصب شده در عمق سه متر 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 می دهد. اثر طول و سرعت و همچنین اثر متقابل دو عامل بر شاخص های اندازه گیری شده در سطح آماری یک درصد معنی دار می باشد (۳).

دانکن در سطح آماری یک درصد انجام شد. همچنین روند تغییرات ساعتی شاخص های عملکردی سامانه در تیمارهای مختلف با استفاده از نمودارهای نرم افزار اکسل مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۵، مقایسه میانگین صفات در دو سرعت هوای ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه را نشان می دهد. صرف نظر از طول لوله انتقال هوا، دمای خروجی هوا در سرعت ۵ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در حدود ۲/۵°C درجه خنک تر می باشد. به دلیل اختلاف بیشتر دمای ورودی و خروجی هوا در سرعت ۵ متر بر ثانیه، راندمان و ضریب عملکرد سامانه در این سرعت در مقایسه با تیمار سرعت ۱۰ متر بر ثانیه بیشتر می باشد. نتایج پژوهش های محققین دیگر نیز نشان می دهد هر چقدر سرعت انتقال هوا کم تر باشد به دلیل افزایش مدت زمان سطح تماس هوا و سطح داخلی لوله، تبادل حرارتی بین دو محیط هوا افزایش می یابد. در نتیجه، درصد کاهش دمای خروجی در مقایسه با سرعت های بالاتر، بیشتر می باشد (۱۰).

توان سرمایشی زمین گرمایی

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

$$Q_c = \left(\frac{\pi}{4}\right) \rho_a d_1^2 v C_a (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

که در آن:

Q _c	توان سرمایشی زمین گرمایی (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)
ρ _a	جرم مخصوص هوا (kg/m ³)

تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر روی صفات اندازه گیری شده با استفاده از نرم افزار SPSS-15 انجام شد. مقایسه میانگین صفات مذکور به روش آزمون جدول ۴ مقایسه میانگین شاخص های اندازه گیری شده در سه طول لوله را نشان می دهد. کمترین مقادیر شاخص ها در طول ۱۷ متر مشاهده می شود. اختلاف دمای خروجی راندمان سامانه در دو طول لوله ۳۴ و ۵۲ متر در سطح آماری یک درصد معنی دار نیست. دلیل این موضوع این است که با افزایش طول لوله انتقال هوا، سطح تماس انتقال حرارت افزایش می یابد (۹). اگر طول لوله خیلی کم باشد با توجه به کم شدن سطح تماس بین هوا و سطح داخلی لوله، سرعت تبادل حرارت بین هوای در حال حرکت و محیط خاک کم می شود و لذا دمای خروجی نیز بالاتر می باشد (۹). بعد از یک طول مشخصی از لوله، با توجه به این که دمای هوا و خاک به تعادل رسیده اند، عملاً

هدایتی پور و همکاران: بررسی اثر طول لوله و سرعت هوا بر...

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس اثر طول لوله و سرعت هوا بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده

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

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

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

**: Significant at 1% probability level

ns: non-significant

جدول (۴) مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در سه سطح فاکتور طول لوله

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

طول لوله جریانی 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)

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 متربرثانه 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

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 متربرثانه 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 (شکل ۲). شاخص راندمان و ضریب عملکرد در

متر در دو سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۲/۵ و ۴/۱ به دست آمده است. به عبارتی در هر دو طول لوله (۳۴ و ۵۴ متر)، ضریب عملکرد (و در 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 نقطه نظر 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 ۲۴ ساعته نشان می‌دهد. این مقادیر میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده 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 تقریباً برابر دمای خاک و یا کمتر از آن می‌شود که در نتیجه آن، سامانه در حالت گرمایشی قرار می‌گیرد. همچنین به علت این که 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 پایین بودن راندمان و ضریب عملکرد توصیه نمی‌شود.

هوای درون لوله ۵ متر بر ثانیه توصیه می‌شود. در تیمار با طول ۳۴ متر، دمای هوای خروجی در دو سطح سرعت ۱۰ 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 متر بر ثانیه در حدود ۳۴ متر است در حالی که با توجه به شکل ۲، طول اشباع در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه 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 تقریباً یکی می‌باشد (شکل ۲). 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 تقریباً یکسان می‌باشد. متوسط دمای خروجی (میانگین دو سرعت) در دو طول ۵۲ و ۳۴ متر تقریباً 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 طول‌های ۳۴ و ۵۲

جدول (۵) مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده 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)	ضریب عملکرد	راندمان	دمای هوای خروجی (°C)
Air velocity (m/s)	Coefficient of performance	Efficiency	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 اندازه‌گیری شده در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد

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

هدایتی پور و همکاران: بررسی اثر طول لوله و سرعت هوا بر...

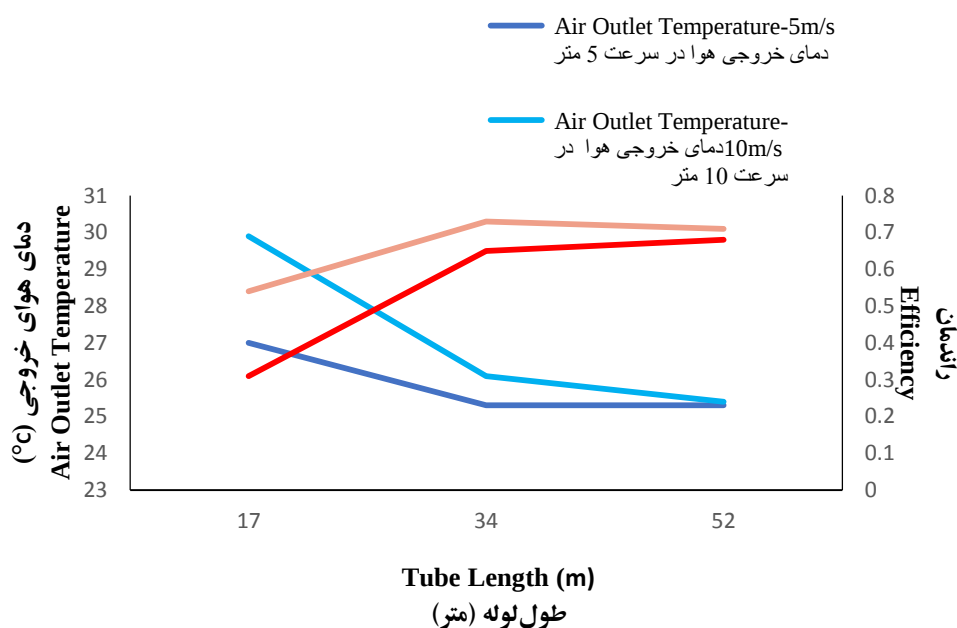
جدول (۶) مقایسه میانگین اثر مقابل طول لوله و سرعت هوا بر روی شاخص‌های اندازه‌گیری شده

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

طول لوله انتقال هوا (m)	سرعت هوا (m/s)	ضریب عملکرد	راندمان	دمای هوای خروجی (°C)
Length of air transferring pipe (m)	Air velocity (m/s)	Coefficient of performance	Efficiency	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

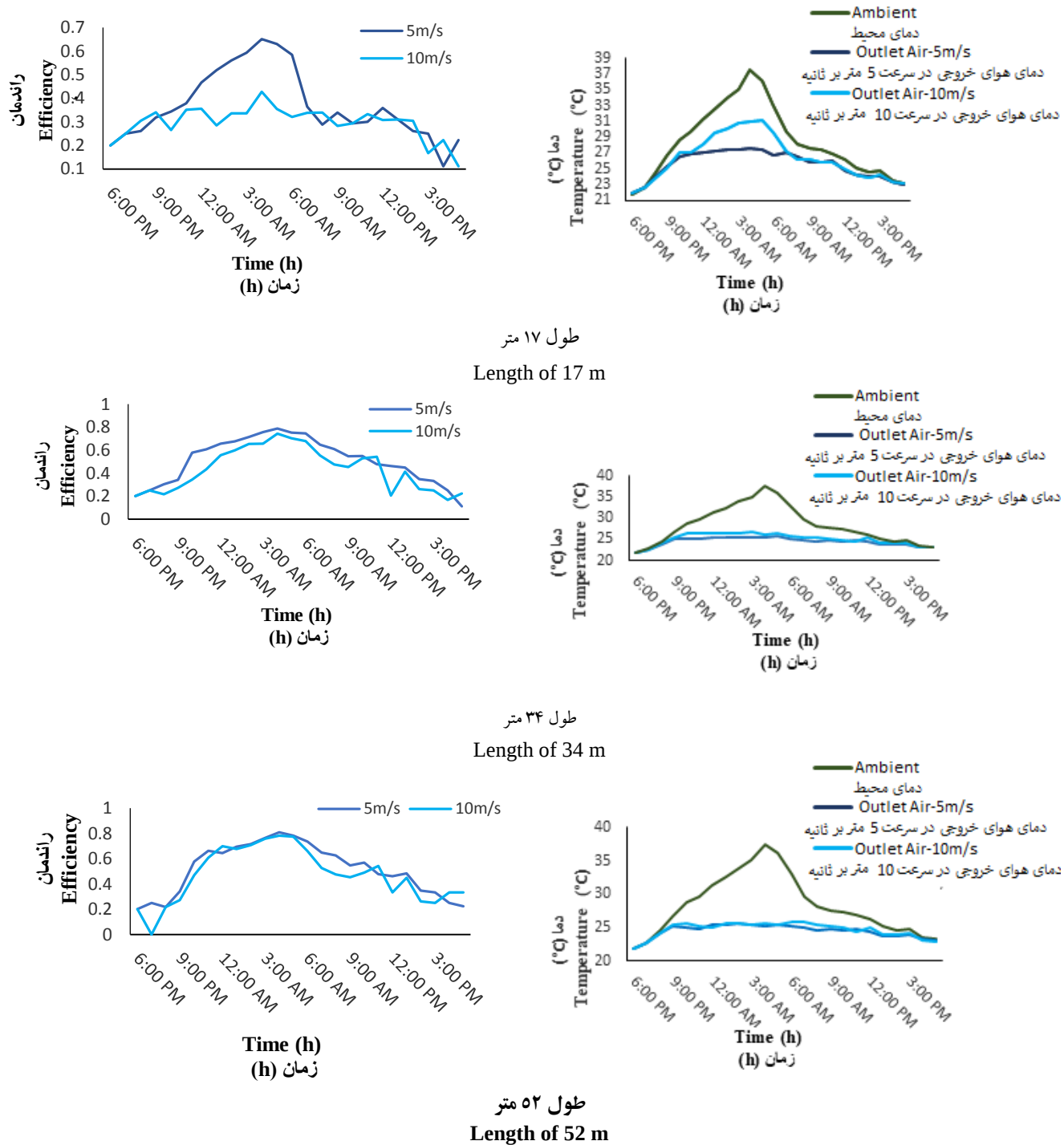
حروف مختلف در هر ستون بیانگر این است که بر اساس آزمون دانکن بین صفات اندازه‌گیری شده در سطح آماری ۱٪ اختلاف معنی‌دار وجود دارد

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 متر بر ثانیه

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



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

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد در صورتی که طول لوله انتقال هوا ۳۴ و ۵۲ متر باشد، سرعت هوا تاثیر معنی داری بر روی هوای خروجی و شاخص راندمان ندارد. متوسط دمای خروجی در در دو طول ۵۲ و ۳۴ متر به ترتیب ۲۵/۳ و ۲۵/۵ درجه سلسیوس می باشد. میانگین راندمان در دو طول مذکور تقریباً یکسان می باشد (به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۶۶) با این حال با توجه به این که مقدار توان تولید شده، بستگی به سرعت هوا دارد، بهتر است سرعت هوا ۱۰ متر بر ثانیه 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 متر بر ثانیه به ترتیب ۳/۱ و ۱/۹ کیلووات می باشد. بر این اساس، بهترین عملکرد سامانه از نظر مقدار کاهش دمای خروجی و دو شاخص راندمان و ضریب عملکرد، در شرایطی به دست می آید

که طول لوله ۳۴ متر و سرعت هوای داخل لوله ۱۰ متر بر ثانیه باشد. در صورتی که طول لوله انتقال هوا ۱۷ متر باشد، مقدار دمای خروجی هوا در دو سرعت ۱۰ و ۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۲۹/۹ و ۲۷ درجه سلسیوس می باشد. 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 سلسیوس، مناسب محیط گلخانه باشد، می توان طول لوله را ۱۷ متر در نظر گرفت در این حالت جهت جلوگیری از کاهش راندمان سامانه، سرعت هوای درون لوله، ۵ متر بر ثانیه در نظر 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.