

The effect of Soil Moisture on the Performance and Efficiency of Open and Closed loop Geothermal System in a sample greenhouse

Abolfazl Hedayatipour¹, Mohsen Soleymani^{2*} , Mostafa Kiani Deh-Kiani²

Received: 05 May 2024

Accepted: 28 November 2024

1-Ph.D. Student, Dept. of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2-Assoc. Prof., Dept. of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Corresponding Author Mohsen Soleymani E-mail: m.soleymani@scu.ac.ir

Abstract

Background & Objectives: One of the accessible renewable energy sources in all parts of the world is surface geothermal energy. The objective of this experiment was evaluation the effect of the type of air circulation and soil moisture around the air transmission pipe on the output air temperature, efficiency and coefficient of performance (COP) of a shallow geothermal system in the cooling of greenhouse.

Materials and Methods: A split plot experiment in the form of randomized complete blocks was conducted in a experimental greenhouses located in Arak region in four replications, from July to August 2022. The main plots were the soil moisture contents around the air transmission pipe at two levels of 25% and 10%, and sub plots were two types of air circulation, including open loop and closed loop. A centrifugal fan with a power of 760 watts was used for air circulation. Air circulation was open one day and closed the next. Using a single-channel data logger, the ambient temperature and air temperature entering and exiting the system were recorded and stored at 10-minute intervals. Efficiency and coefficient of performance were calculated during the hottest hours of the day. Finally, analysis of variance of the effect of experimental factors on dependent factors, and comparison of means were performed using MSTAT-C software.

Results: According to the results, the effect of soil moisture content on the variables of system outlet air temperature, COP and efficiency was significant. Also, although the effect of the air circulation method (closed or open circuit) on the outlet air temperature was not significant, it significantly affected the coefficient of performance and efficiency. The interaction effect of these two independent variables was not significant on any of the dependent variables. The temperature of the fan inlet air (ambient air) during hot hours of the day had no effect on the fan outlet air temperature. Therefore, the use of the system is recommended both in temperate regions (central regions of the country) and in very hot regions (southern regions of the country). In the closed-loop method, with an increase in the difference between the inlet and outlet air temperatures of the system, the amount of power produced and the coefficient of performance of the system are greater compared to the open-loop method.

Conclusion: The higher the ambient air temperature, the higher the COP and efficiency of the system. As soil moisture around the air transmission pipe increases, the output temperature of the system decreases. Therefore, the efficiency and COP of the system increases.

Keywords: Renewable Energies, Sustainability, Air to Earth Heat Exchanger, Shallow Geothermal, Pre-Cooling



This is an open-access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)

Copyright@ 2026 Mohsen Soleymani E-mail: m.soleymani@scu.ac.ir

<https://doi.org/10.22034/saps.2024.61526.3217>



تأثیر رطوبت خاک بر عملکرد و راندمان سامانه زمین گرمایی در دو حالت حلقه باز و بسته در سرمایش گلخانه

ابوالفضل هدایتی پور^۱، محسن سلیمانی^{۲*}، مصطفی کیانی ده کیانی^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

مقدمه و اهداف: یکی از منابع انرژی قابل دسترس در تمام نقاط دنیا، انرژی گرمای زمین است. هدف از انجام این آزمایش، ارزیابی تأثیر نحوه چرخش هوا و مقدار رطوبت خاک اطراف لوله انتقال هوا بر دمای هوای خروجی، راندمان و ضریب عملکرد یک سامانه زمین گرمایی سطحی در سرمایش گلخانه بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در تیر و مرداد ۱۴۰۱ در یک گلخانه تحقیقاتی از نوع تونلی قوسی مجهز به تجهیزات زمین گرمایی در شهر اراک انجام شد. هیچ‌گونه سامانه سرمایشی دیگری در این آزمایش استفاده نشد. رطوبت خاک اطراف لوله در دو سطح ۱۰ و ۲۵ درصد، به عنوان کرت اصلی و دو نوع چرخش هوای حلقه باز و بسته، به عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. برای چرخش هوا، از فن گریز از مرکز با توان ۷۶۰ وات استفاده شد. چرخش هوا یک روز به صورت باز و روز دیگر به صورت بسته بود. با استفاده از یک دیتالاگر تک‌کاناله، دمای محیط و هوای ورودی به گلخانه به فواصل زمانی هر ۱۰ دقیقه، ثبت و ذخیره می‌شد. راندمان و ضریب عملکرد در گرم‌ترین ساعات روز اندازه‌گیری و محاسبه شد. در نهایت آنالیز واریانس تأثیر عامل‌های آزمایش بر روی صفات اندازه‌گیری شده و همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C انجام شد.

نتایج: با توجه به نتایج، اثر میزان رطوبت خاک بر متغیرهای دمای هوای خروجی سامانه، ضریب عملکرد و راندمان معنی‌دار بود. همچنین با این که اثر نحوه چرخش هوا (حلقه بسته یا باز) بر میزان دمای هوای خروجی معنی‌دار نبود، اما بر ضریب عملکرد و راندمان معنی‌دار بود. اثر متقابل این دو متغیر مستقل بر هیچ کدام از متغیرهای وابسته معنی‌دار نبود. دمای هوای ورودی فن (هوای محیط) در ساعات گرم روز، تأثیری بر روی دمای هوای خروجی فن نداشت. بنابراین، استفاده از سامانه، هم در مناطق معتدل (مناطق مرکزی کشور) و هم در مناطق بسیارگرم (مناطق جنوبی کشور) قابل توصیه می‌باشد. در روش حلقه بسته با افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه، مقدار توان تولیدشده و مقدار ضریب عملکرد سامانه در مقایسه با روش حلقه باز بیشتر می‌باشد.

یافته‌ها: با افزایش دمای هوای ورودی، ضریب عملکرد و راندمان سامانه افزایش می‌یابد. با افزایش رطوبت خاک، دمای هوای خروجی سامانه کاهش می‌یابد که به دنبال آن، راندمان و ضریب عملکرد سامانه افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، پایداری، پمپ حرارتی زمین- هوا، گرمای زمین سطحی، پیش سرمایش

مقدمه

خاک به دلیل ارزش گرمایی بالا، یک منبع گرمایی عظیم به شمار می‌رود (میسرا و همکاران ۲۰۱۲). گرمای موجود در لایه‌های سطحی زمین به راحتی قابل استخراج است (آگراوال ۲۰۱۸). بسته به نوع خاک و شرایط فیزیکی سطح خاک، دمای خاک از یک عمق مشخصی تقریباً ثابت می‌ماند (گودا ۲۰۱۰). برخی محققین اظهار داشته‌اند که دمای خاک از عمق بیشتر از پنج متر تقریباً ثابت می‌ماند (ویلیامز و گلد ۱۹۷۶). با این حال نتایج تعدادی از مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد تغییرات دمای خاک در عمق سه تا پنج متری تابعی از فصل سال می‌باشد، ولی این تغییرات در طول یک فصل ناچیز می‌باشد. نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تغییرات دمای خاک در عمق ۱۰ متر از سطح زمین، در طول سال در گستره دمایی ۱۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس تقریباً ثابت است (آلام و همکاران ۲۰۱۵). یکی از روش‌های استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، به چرخش درآوردن هوا از طریق کانال زیرزمینی می‌باشد که اصطلاحاً مبدل حرارتی هوا-زمین^۱ نامیده می‌شود. معمولاً در فصل سرد، با توجه به بیشتربودن دمای زمین نسبت به دمای محیط، می‌توان از انرژی زمین‌گرمایی برای گرمایش محیط استفاده کرد. برعکس در فصل گرم، استفاده از این سامانه، برای سرمایش محیط امکان‌پذیر می‌باشد. الگوی چرخش هوا در سامانه زمین‌گرمایی به دو صورت حلقه‌باز و حلقه‌بسته می‌باشد (فریدی و همکاران ۲۰۲۱). در الگوی حلقه‌باز، هوای بیرون از طریق یک فن 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 تا ۳ متر است (آسیون و همکاران ۲۰۱۱ و لی و همکاران ۲۰۱۴). طول لوله انتقال هوا معمولاً ۵۰ متر توصیه می‌شود (آسیون و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال، برخی محققین طول ۳۰ تا ۵۰ متر را توصیه کرده‌اند

(بالاتراچه و همکاران ۲۰۱۷). همچنین، قطر بهینه لوله در حدود ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر و سرعت هوای داخل لوله ۵ متر بر ثانیه پیشنهاد شده است (ماهچ و بنهامو ۲۰۲۱). عوامل تاثیرگذار بر کارایی سامانه زمین‌گرمایی عبارتند از: جنس، قطر و طول لوله، عمق قراردادی لوله، رطوبت خاک و سرعت جریان هوای لوله (آراند و آریزمندی ۲۰۲۳ و ان‌وتیچا و همکاران ۲۰۲۲). نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد جنس لوله کمترین تأثیر را بر روی دمای خروجی هوا دارد، ولی طول لوله تأثیر زیادی بر روی دمای خروجی لوله دارد (سخری و همکاران ۲۰۲۰ و چاتورورديا و بارتاریا، ۲۰۱۵). ضریب عملکرد و راندمان سامانه زمین‌گرمایی در فصل گرم بیشتر از فصل سرد می‌باشد (لطیف و همکاران ۲۰۲۲). به دلیل اختلاف دمای بیشتر هوای ورودی و خروجی فن، بالاترین ضریب عملکرد و راندمان، در گرم‌ترین ساعات روز به دست می‌آید (لطیف و همکاران ۲۰۲۲). رطوبت خاک یکی از عوامل تاثیرگذار در ضریب انتقال حرارت می‌باشد. هدایت گرمایی خاک به شدت تحت تأثیر رطوبت خاک قرار دارد (دمیر و همکاران ۲۰۱۹). با افزایش رطوبت خاک، ذرات بین خاک‌دانه‌ها که توسط هوا پر شده است توسط آب جایگزین می‌شود و هدایت گرمایی خاک افزایش می‌یابد (بورتون‌جانسون ۲۰۲۱). بر اساس نتایج تحقیقات انجام‌شده، با افزایش رطوبت خاک در یک خاک شنی و لومی، ضریب انتشار حرارتی نیز افزایش می‌یابد. ولی در حالت اشباع کامل خاک، این ضریب کاهش می‌یابد (ابوحامد ۲۰۰۳؛ کنی و همکاران، ۲۰۱۸). مرشد و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد سامانه زمین‌گرمایی را در دو حالت خاک خشک و مرطوب در کشور عراق مورد مطالعه قرار دادند. این محققین برای مرطوب‌کردن خاک اطراف لوله از نوار آبیاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که افزایش رطوبت خاک اطراف لوله انتقال هوا، باعث افزایش ضرایب هدایت و انتشارگرمایی خاک شده و در نتیجه، عملکرد سامانه بهبود یافته است. در این مطالعه، ضریب عملکرد سامانه در حالت خاک مرطوب و خشک به ترتیب ۶/۴۱ و ۵/۰۷ به دست آمد. همچنین دمای هوای

¹ Earth-Air Heat Exchanger(EAHE)

رطوبت، تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. در حالت حلقه‌بسته دمای هوای داخل گلخانه در مناطق معتدل از جمله اراک در فصل گرم به بیش از ۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین نتایج این آزمایش برای هر دو منطقه معتدل و گرم (مانند شهر اهواز) قابل‌استفاده می‌باشد. هدف اصلی اجرای آیین آزمایش بررسی تاثیر دمای هوای ورودی سامانه و همچنین مقدار رطوبت خاک اطراف لوله بر روی دمای خروجی سامانه، راندمان و ضریب عملکرد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تاثیر رطوبت خاک و نوع چرخش هوا بر عملکرد و دمای هوای ورودی به گلخانه، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده و در چهار تکرار در دو گلخانه تحقیقاتی هر یک به مساحت ۶۵ متر مربع در تیر و مرداد ۱۴۰۱ واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی (اراک) انجام شد. رطوبت خاک اطراف لوله در دو سطح ۲۵ و ۱۰ درصد به عنوان کرت اصلی و دو الگوی چرخش هوا، حلقه‌باز و حلقه‌بسته به عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. گلخانه‌های تحقیقاتی از نوع تونلی قوسی^۱ بوده که به تجهیزات زمین‌گرایی مجهز 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. متوسط دمای سالانه شهر اراک ۱۳/۸ درجه سلسیوس است و مرداد با میانگین ۲۷ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه و بهمن با میانگین ۰/۳ درجه سلسیوس، سردترین ماه سال است. مشخصات گلخانه آزمایشی در

خروجی فن در حالت خاک مرطوب در حدود ۱/۵ درجه خنک‌تر بود. بر اساس نتایج مطالعات آسیکون و همکاران (۲۰۱۱)، عملکرد گرمایی سامانه زمین‌گرایی به طول ۵۰ متر و عمق ۳ متر، در شرایط خاک مرطوب نسبت به خاک خشک بیشتر می‌باشد. لویی و همکاران (۲۰۱۹)، عملکرد سامانه زمین‌گرایی در سرمایش و گرمایش در یک فصل گرم را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج، توان سرمایشی تولید شده در طول ساعات ۱۰ صبح تا ۶ بعدازظهر، دو برابر توان سرمایشی تولید شده در ساعات اولیه صبح می‌باشد. همچنین در گرم‌ترین ساعات روز، تغییرات دمای هوای ورودی تاثیر بر مقدار دمای هوای خروجی نداشته است. الجوبریا و ریدها (۲۰۱۷)، از سامانه زمین‌گرایی برای سرمایش گلخانه در کشور عراق استفاده کردند. نتایج نشان داد که اختلاف دمای محیط و هوای خروجی سامانه در حدود ۱۲ الی ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. المین‌شاو و همکاران (۲۰۱۷)، پارامترهای موثر بر ظرفیت سرمایشی سامانه زمین‌گرایی را مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج، در صورتی که دمای هوای ورودی در محدوده ۴۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس باشد، به دلیل افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی، ظرفیت سرمایش سامانه تقریباً ۲/۳ برابر حالتی است که دمای ورودی بین ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس است. سونگ و همکاران (۲۰۱۹)، تاثیر رطوبت خاک بر روی عملکرد سامانه زمین‌گرایی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش رطوبت خاک، توان حرارتی سامانه از ۱/۱ W/m به ۲/۵ W/m افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج تحقیقات لین و همکاران (۲۰۲۰)، اثر رطوبت خاک اطراف لوله در حالتی که سرعت هوا خیلی کم باشد، ناچیز می‌باشد. ولی در سرعت بالای ۴ متر بر ثانیه، عملکرد سامانه، با افزایش

آورده شده است.

مشخصات گلخانه آزمایشی

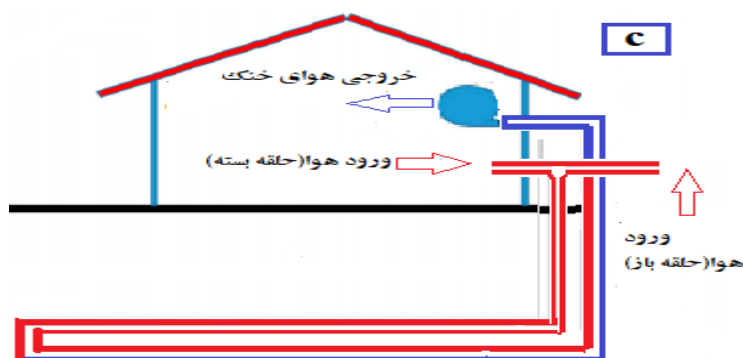
جدول ۱- مشخصات گلخانه آزمایشی

نوع گلخانه	مساحت (m ²)	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	جهت گلخانه	پوشش گلخانه
تونلی قوسی	۶۵	۱۵	۱۰	۳.۵	شرقی- غربی	پلاستیک تک لایه



گذاشتن آجر مشبک در قسمت پایین آن، آب از طریق این سوراخ‌ها خارج می‌شد (شکل ۱-ب). در هر گلخانه، با استفاده از یک سه‌راهی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر، چرخش هوا به صورت باز و بسته در هر دو لوله انتقال هوا امکان‌پذیر شد (شکل ۱-ج). به این صورت که با مسدودکردن ورودی لوله داخل گلخانه، هوای بیرون گلخانه به واسطه مکش فن، وارد چرخه می‌شد. در این حالت سامانه در حالت حلقه‌باز قرار می‌گرفت (شکل ۱-د). برعکس با مسدودکردن ورودی لوله بیرونی، سامانه به صورت چرخش بسته عمل می‌کرد (شکل ۱-ه). هیچ‌گونه سامانه سرمایشی دیگری در این آزمایش استفاده نشد. رطوبت خاک در عمق سه متری زمین، در روز اول خرداد ۱۴۰۱ با استفاده از روش وزنی اندازه‌گیری شد که در محدوده ۹-۱۱ درصد بود (میانگین رطوبت خاک: ۱۰ درصد).

برای هر یک از گلخانه‌ها یک کانال به طول ۵۴ متر و عمق ۳ متر به صورت حلقوی در بیرون از گلخانه با استفاده از بیل مکانیکی حفر شد (شکل ۱-ا). بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده قطر بهینه انتقال هوا بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد، در هر دو کانال، برای انتقال هوا از یک لوله پی‌وی‌سی به قطر ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شد (کوشال و همکاران، ۲۰۱۵). علت اصلی استفاده از لوله پی‌وی‌سی، ارزان‌تر بودن قیمت آن در مقایسه با انواع دیگر لوله می‌باشد. از سوی دیگر، بر اساس مطالعات انجام‌شده، جنس لوله در مقایسه با سایر عوامل تاثیر گذار بر کارایی سامانه، از جمله قطر و طول لوله، عمق لوله و سرعت هوا، کمترین تاثیر را بر عملکرد سامانه زمین‌گرمایی دارد (سخری، ۲۰۲۰). جهت جلوگیری از تجمع آب، لوله‌ها در کف کانال به صورت شیب‌دار قرار گرفتند. برای خروج آب، در قسمت تحتانی زانو چند سوراخ تعبیه شد و با





شکل ۱- قراردمی لوله (a)- ایجاد سوراخ جهت خروج اب (b)- شماتیک نحوه ورود هوای خنک به داخل گلخانه و نحوه ورود هوا از داخل و بیرن گلخانه (c) هوای ورودی از داخل- حلقه بسته (d) هوای ورودی از خارج گلخانه-حلقه باز(e)- فن (f)

اندازه‌گیری شد و بر اساس آن، دستگاه رطوبت‌سنج کالیبره شد. در طول زمان آزمایش، رطوبت خاک اطراف هر دو لوله، توسط رطوبت‌سنج قرائت می‌شد و در صورت نیاز، آبدهی به خاک اطراف لوله انجام می‌شد. بافت خاک محل آزمایش شنی-لوم بود (مقدار رس، سیلت و شن به ترتیب ۱۹، ۲۵ و ۵۶ درصد بود). برای چرخش هوا، در هر یک از لوله‌ها، یک دستگاه فن گریز از مرکز با توان ۷۶۰ وات استفاده شد (شکل ۱-f). با استفاده از دیتالاگر تک‌کاناله، دمای محیط و هوای ورودی به گلخانه به فواصل زمانی هر ۱۰ دقیقه، ثبت و ذخیره می‌شد. مشخصات دیتالاگر استفاده‌شده در جدول ۲ آورده شده است.

در یکی از کانال‌ها و در مجاورت لوله انتقال هوا، جهت افزایش رطوبت وزنی خاک تا میزان ۲۵ درصد، یک نوار آبیاری حاوی قطره‌چکان به قطر ۱۶ میلی‌متر در فاصله ۱۵ سانتی‌متری بالای لوله قرار داده شد. جهت آگاهی از مقدار رطوبت خاک در طول آزمایش، در اطراف هر لوله، دو بلوک گچی قرار داده شد. سیم‌های متصل به بلوک‌گچی توسط یک لوله پی‌وی‌سی به قطر پنج سانتی‌متر به قسمت سطحی خاک هدایت شدند به نحوی که قرائت رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج خاک (ساخت شرکت Soil Moisture، مدل A۵۹۱۰) امکان‌پذیر گردید. در ابتدا خاک نرم به ضخامت ۱۵ الی ۲۰ سانتی‌متر در اطراف لوله‌ها ریخته شد. قبل از پرکردن کانال‌ها، رطوبت چندین نمونه خاک به روش وزنی

جدول ۲- خصوصیات اصلی دیتالاگر مورد استفاده در گلخانه

کشور سازنده	چین
مدل دستگاه	Cem1365
دقت اندازه‌گیری دما	۰.۳
محدوده اندازه‌گیری دما	۳۰.۰°C - ۶۰.۰°C
دقت رطوبت نسبی هوا	۲ درصد
ظرفیت حافظه	۳۲۰۰۰ داده

دو فن دائماً روشن بودند. چرخش هوا یک روز به صورت باز و روز دیگر به صورت بسته بود. دمای هوای ورودی فن و خروجی، در کلیه ساعات شبانه‌روز اندازه‌گیری می‌شد. با این حال در این آزمایش میانگین دمای هوای ورودی و خروجی، راندمان و ضریب عملکرد در گرم‌ترین ساعات روز (بین ساعات ۱۴ تا ۱۸)

با تغییر ولتاژ، دور الکتروموتور طوری تنظیم شد که، سرعت انتقال هوای داخل لوله بر روی سرعت ۵ متربرثانیه تثبیت شود. برای اندازه‌گیری سرعت هوا، از دستگاه سرعت‌سنج هوا ساخت شرکت AZ مدل ۸۹۰۲ استفاده گردید. داده‌های ذخیره‌شده به محیط اکسل منتقل شد. این آزمایش طی ماه‌های تیر و مرداد انجام شد و هر

C_a : گرمای ویژه هوا ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

T_{out} : دمای هوای خروجی دمنده ($^\circ\text{C}$)

T_{in} : دمای هوای ورودی دمنده ($^\circ\text{C}$)

ضریب عملکرد سامانه نیز با استفاده از رابطه شماره سه به دست آمد (لطیف و همکاران، ۲۰۲۲).

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad [3]$$

که در آن:

COP: ضریب عملکرد سامانه (بدون واحد)

Q_c : توان سرمایشی زمین گرمایی تبادل شده (KW)

W : توان مصرفی الکتروموتور برای چرخش فن (KW)

در انتها به منظور بررسی تداوم نتایج آزمایش در طول فصل گرم، روند تغییرات دمای محیط، دمای هوای خروجی فن، راندمان و ضریب عملکرد سامانه در تیر و مرداد (یک بازه ۶۰ روزه) با استفاده از نرم افزار اکسل به صورت نمودار خطی بررسی گردید.

نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثرات عوامل اصلی و فرعی و همچنین اثرات متقابل این دو عامل بر صفات اندازه گیری شده را نشان می دهد. توضیح این که میانگین دمای خاک در بازه زمانی آزمایش ۲۲/۳ درجه سلسیوس بود.

اندازه گیری و محاسبه شد. در هر دو سامانه، میانگین داده های اندازه گیری شده در بازه زمانی هر شش روز، به عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. آنالیز واریانس تاثیر عامل های آزمایش بر روی صفات اندازه گیری شده و همچنین مقایسه میانگین ها با استفاده از نرم افزار MSTAT-C انجام شد.

راندمان سامانه زمین گرمایی بر اساس رابطه شماره

یک محاسبه شد (گریکو و ماسلی، ۲۰۲۰)

$$\eta_{ETAHE} = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{soil} - T_{in}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن:

η : راندمان سامانه زمین گرمایی

T_{out} : دمای هوای خروجی فن ($^\circ\text{C}$)

T_{in} : دمای هوای ورودی فن که در واقع دمای محیط

است ($^\circ\text{C}$)

T_{soil} : دمای خاک ($^\circ\text{C}$)

و توان سرمایشی تولید شده با استفاده از رابطه شماره دو به دست آمد (لیوو همکاران، ۲۰۱۹).

$$Q_c = (\pi/4) \rho_a d_i^2 v C_a (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن:

Q_c : توان سرمایشی زمین گرمایی (kW)

ρ_a : جرم مخصوص هوا (kg/m^3)

d_i : قطر داخلی لوله (m)

v : سرعت هوا (m/s)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرات نوع چرخش هوا و رطوبت خاک بر صفات اندازه گیری شده

میانگین مربعات (MS)			درجه آزادی	منابع تغییر
راندمان	ضریب عملکرد	دمای هوای خروجی ($^\circ\text{C}$)		
0.0007^{ns}	0.01^{ns}	0.14^{ns}	۳	بلوک
0.04^{**}	$1/19^{**}$	16^{**}	۱	رطوبت خاک اطراف لوله
0.00001	0.004	0.06	۳	خطای اصلی
0.018^{**}	$72/4^{**}$	0.03^{ns}	۱	نحوه چرخش هوا
0.002^{ns}	0.02^{ns}	0.33^{ns}	۱	نحوه چرخش هوا × رطوبت
0.0003	0.007	0.108	۶	خطای فرعی
$1/64$	$1/6$	$1/79$		ضریب تغییرات (%)

** و ns به ترتیب نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار در سطح آماری یک درصد و عدم وجود اختلاف معنی داری می باشد.



سرمايشی تبادلای سامانه نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار ضریب عملکرد سامانه با افزایش رطوبت خاک اطراف لوله، افزایش می‌یابد. با توجه به مقادیر جدول ۴، با افزایش مقدار رطوبت خاک اطراف لوله، راندمان افزایش می‌یابد. میانگین راندمان در رطوبت‌های ۱۰ و ۲۵ درصد به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۹۴ می‌باشد که در سطح آماری یک‌درصد معنی‌دار می‌باشد. دلیل این موضوع این است که با افزایش رطوبت خاک اطراف لوله، دمای خروجی هوا کاهش می‌یابد و در نتیجه مطابق رابطه Error! Reference source not found. اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج تحقیقات دمیر و همکاران (۲۰۱۹)، مطابقت دارد.

اثر رطوبت خاک اطراف لوله بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده

جدول ۴ مقایسه صفات اندازه‌گیری شده در دو در رطوبت متفاوت خاک اطراف لوله را نشان می‌دهد. با افزایش رطوبت خاک، هدایت گرمایی خاک افزایش می‌یابد که در نتیجه آن، سرعت انتقال گرما بین دو محیط خاک و هوای درحال چرخش افزایش می‌یابد. در واقع دمای هوای داخل لوله سریع‌تر به دمای خاک نزدیک می‌شود. دمای هوای خروجی، در حالتی که خاک اطراف لوله، مرطوب‌تر است، در حدود دو درجه سلسیوس، خنک‌تر از خاک نسبتاً خشک می‌باشد (ابوحامد ۲۰۰۳؛ کنی و همکاران ۲۰۱۸ و مرشد و همکاران، ۲۰۱۸). به واسطه افزایش اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی فن، توان

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده با دو سطح رطوبت خاک اطراف لوله

رطوبت خاک اطراف لوله	دمای هوای خروجی (°C)	ضریب عملکرد	راندمان (بدون واحد)
۱۰٪	۲۵/۶a ¹	۵/۴b	۰/۸۴b
۲۵٪	۲۳/۶b	۵/۹a	۰/۹۴a

۱. میانگین‌های با حروف مختلف، در سطح آماری یک درصد اختلاف معنی دار دارند.

دمای هوای خروجی فن (در هر دو تیمار رطوبت خاک) در هر دو تیمار تقریباً یکسان می‌باشد. به بیان دیگر، دمای هوای ورودی فن (هوای محیط) در ساعات گرم روز، تاثیری بر روی دمای هوای خروجی فن نداشته است. مشابه چنین نتایجی را لویی و همکاران (۲۰۱۹) و المین‌شاو (۲۰۱۷) به دست آورده‌اند. این نتیجه بیانگر این نکته است که استفاده از سامانه، هم در مناطق معتدل (مناطق مرکزی کشور) و هم در مناطق بسیارگرم (مناطق جنوبی کشور) قابل توصیه می‌باشد.

اثر نوع چرخش هوا بر صفات اندازه‌گیری شده
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر الگوی چرخش بر روی دمای خروجی، راندمان و ضریب عملکرد سامانه در سطح آماری یک‌درصد معنی‌دار می‌باشد. جدول ۵ مقایسه میانگین صفات در دو روش چرخش هوا را نشان می‌دهد. در روش حلقه بسته، هوای داخل گلخانه به عنوان هوای ورودی سامانه می‌باشد. میانگین دمای هوای گلخانه (دمای ورودی فن) در حالت حلقه بسته و باز به ترتیب ۵۴ و ۳۸ درجه سلسیوس می‌باشد. با این حال

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده در دو الگوی چرخش هوا

نوع چرخش هوا	دمای هوای خروجی (°C)	ضریب عملکرد	راندمان (بدون واحد)
حلقه بسته	۲۴/۶a ¹	۷/۸a	۰/۹۲a

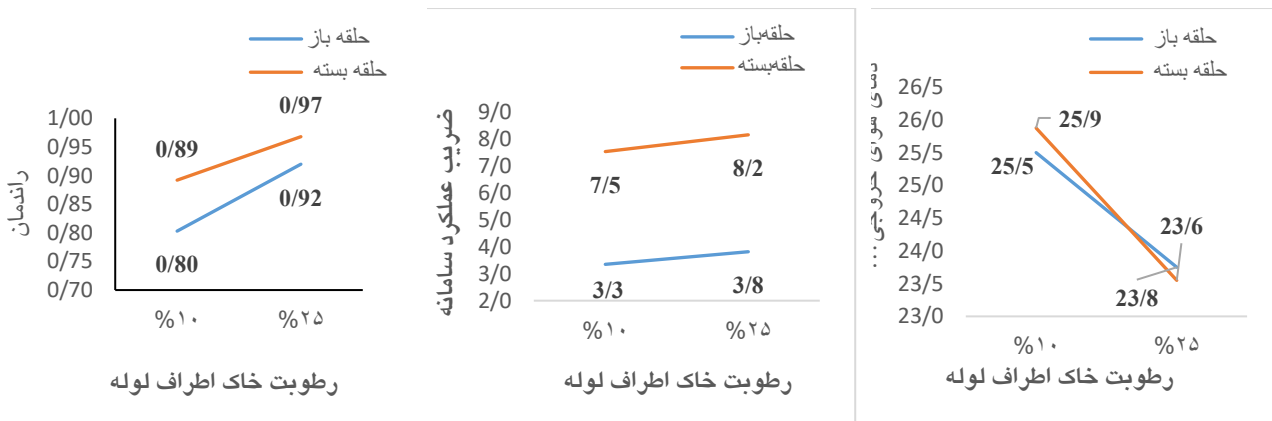


حلقه باز ۲۴/۷b ۳/۶b ۰/۸۶b
 ۱. حروف مختلف نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح آماری یک و پنج درصد می باشد

که هر چه دمای هوای ورودی بیشتر باشد، راندمان سامانه نیز افزایش می یابد (سونگ و همکاران، ۲۰۱۹).

اثر متقابل الگوی چرخش هوا و رطوبت خاک اطراف لوله مطابق جدول ۳، اثر متقابل دو عامل آزمایش بر روی همه صفات اندازه گیری شده در سطح آماری پنج درصد معنی دار نیست. با توجه به شکل ۲، که دمای هوای خروجی، ضریب عملکرد و راندمان سامانه در دو حالت حلقه باز و بسته را برای دو سطح رطوبتی نشان می دهد، اثر متقابل رطوبت و نوع چرخش بر ضریب عملکرد، معنی دار نمی باشد. اما دمای هوای خروجی در هر دو حالت حلقه باز و بسته، در رطوبت ۲۵٪ نسبت به رطوبت ۱۰٪ کاهش یافته است. ولی در مورد ضریب عملکرد و راندمان سامانه، روند برعکس است و با افزایش رطوبت خاک این دو شاخص افزایش می یابد که دلایل آن در قسمت بررسی اثرات اصلی بحث شد.

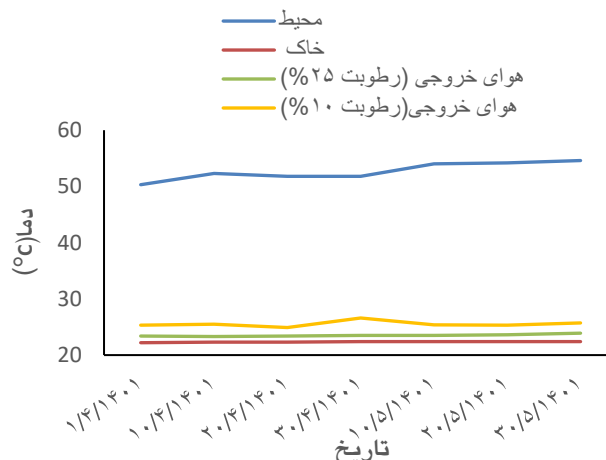
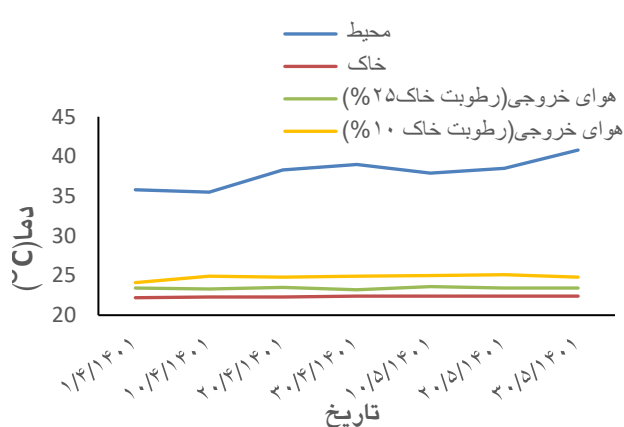
در روش حلقه بسته، راندمان و ضریب عملکرد سامانه بیشتر می باشد. در روش مذکور، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی فن در مقایسه با روش حلقه باز بیشتر می باشد. مطابق رابطه Error! Reference source not found.، هر چه اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه بیشتر باشد، مقدار توان سرمایشی نیز افزایش می یابد. در نتیجه مقدار ضریب عملکرد سامانه که حاصل تقسیم توان سرمایشی به توان الکتریکی فن می باشد، افزایش می یابد (لویی و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین راندمان سامانه در حالت حلقه بسته در مقایسه با حلقه باز، بیشتر می باشد. مطابق رابطه Error! Reference source not found.، در هر دو حالت حلقه باز و بسته، دمای خاک و دمای هوای خروجی تقریباً ثابت است. با این حال، قدر مطلق دمای هوای ورودی و خروجی در روش حلقه بسته بیشتر می باشد و در نتیجه راندمان سامانه در این حالت در مقایسه با حالت حلقه باز بیشتر می شود. محققان دیگری نیز به این نتیجه رسیده اند



شکل ۲- تغییرات دمای هوای خروجی، ضریب عملکرد راندمان سامانه متأثر از رطوبت خاک اطراف لوله در دو حالت حلقه بسته و باز

نشان می دهد. تغییرات دمای خاک در عمق سه متری زمین نیز نشان داده شده است که در طول دوره آزمایش ثابت مانده است.

شکل ۳ نمودار روند تغییرات دمای هوای خروجی لوله، دمای محیط داخل و بیرون گلخانه را در گرم ترین ساعات روز (بین ساعات ۱۴ تا ۱۸) در بازه ۶۰ روزه آزمایش را

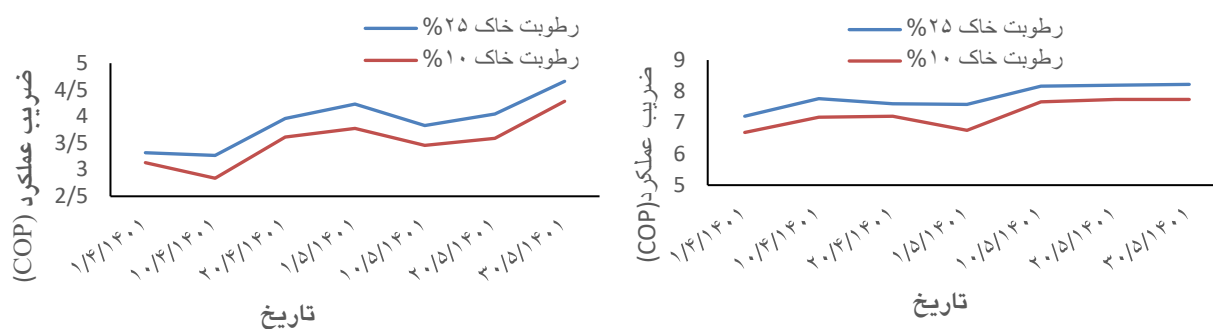


شکل ۳- روند تغییرات دمای هوای ورودی (محیط) و خروجی فن در بازه زمانی ۶۰ روزه در دو حالت حلقه بسته (شکل سمت راست) و حلقه باز (شکل سمت چپ)

نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ در همه تاریخ‌های نشان داده شده، ضریب عملکرد خاک مرطوب در مقایسه با خاک نسبتاً خشک بیشتر می‌باشد. روند صعودی تغییرات ضریب عملکرد سامانه در روش حلقه باز در مقایسه با روش حلقه بسته مشهودتر می‌باشد. در روش حلقه باز، دمای هوای ورودی سامانه مستقیماً متأثر از دمای محیط می‌باشد. با افزایش دمای محیط در مرداد ماه، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب عملکرد سامانه در انتهای بازه زمانی آزمایش افزایش می‌یابد. در حالی که دمای هوای داخل گلخانه نوسانات کمتری نسبت به بیرون دارد و در نتیجه روند افزایشی این صفت با شیب کمتری اتفاق می‌افتد.

مطابق شکل ۳، تغییرات دمای محیط در هر دو حالت حلقه بسته و باز در گرم‌ترین ساعات روز در حدود چهار درجه سلسیوس می‌باشد. با این حال، تغییرات دمای خروجی هوا تقریباً ثابت می‌باشد. این نتایج با نتایج مطالعه (المین شاو و همکاران، ۲۰۱۷) مطابقت دارد. همچنین روند میانگین دمای هوای خروجی در گرم‌ترین ساعات روز در محدوده دو ماه آزمایش در حالتی که رطوبت خاک اطراف لوله ۲۵٪ است، در حدود دو درجه سلسیوس بیشتر می‌باشد. که با نتایج مرشد و همکاران (۲۰۱۸) که اختلاف دمای ۱/۷ درجه سلسیوس به واسطه اختلاف رطوبت خاک را به دست آوردند، مطابقت دارد. روند تغییرات ضریب عملکرد سامانه در گرم‌ترین ساعات روز طی بازه زمانی دوماهه آزمایش در شکل ۴

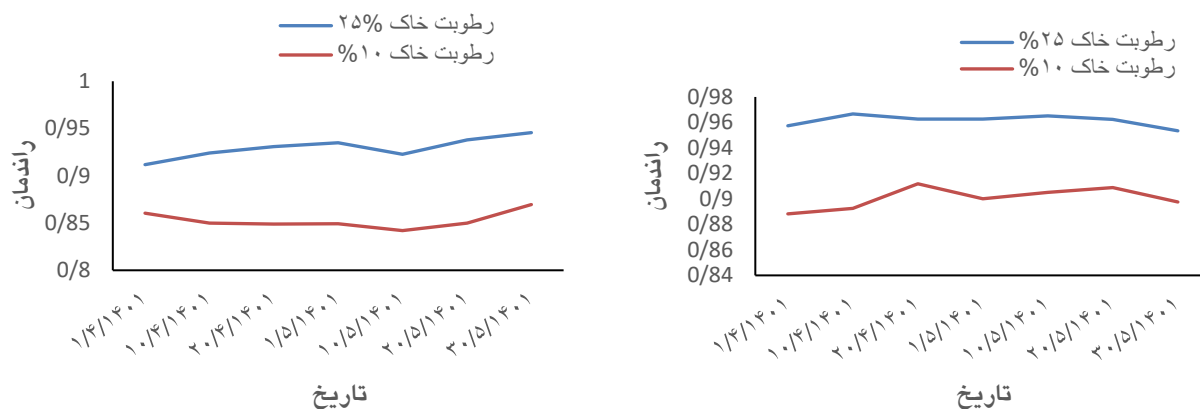




شکل ۴- روند تغییرات ضریب عملکرد در بازه زمانی ۶۰ روزه در دو حالت حلقه بسته (شکل سمت راست) و حلقه باز (شکل سمت چپ)

رطوبت ۲۵ درصد در مقایسه با خاک با رطوبت ۱۰ درصد، بیشتر می‌باشد. به دلیل آنچه که در مورد روند شاخص ضریب عملکرد گفته شد، در این شکل نیز، شیب روند صعودی راندمان در روش حلقه باز بیشتر می‌باشد.

روند تغییرات راندمان سامانه در گرم‌ترین ساعات روز طی بازه زمانی دوماهه آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود در همه تاریخ‌های بازه اجرای آزمایش، راندمان در خاک با



شکل ۵- روند تغییرات راندمان سامانه در بازه زمانی ۶۰ روزه در دو حالت حلقه بسته (شکل سمت راست) و حلقه باز (شکل سمت چپ)

هوای خروجی سامانه، در گرم‌ترین ساعات روز، تحت تأثیر تغییرات دمای محیط قرار نمی‌گیرد. علیرغم این که اختلاف دمای محیط در حالت حلقه باز و بسته در حدود ۱۵ درجه سلسیوس می‌باشد، دمای هوای خروجی سامانه در هر دو سطح رطوبت تقریباً ثابت است. و لذا می‌توان نتیجه گرفت می‌توان از این سامانه هم در مناطق معتدل مرکزی ایران و هم در مناطق گرمتر برای پیش سرمایه‌گذاری گلخانه و واحدهای کشاورزی استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در رطوبت بیشتر خاک اطراف لوله (۲۵٪)، دمای هوای خروجی در مقایسه با خاک با رطوبت کمتر (۱۰٪)، در حدود دو درجه سلسیوس خنک‌تر می‌باشد. به واسطه کاهش دمای هوای خروجی، اختلاف دمای ورودی و خروجی فن کاهش می‌یابد که در نتیجه آن، شاخص‌های راندمان و ضریب عملکرد سامانه افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد، دمای

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA1401.26966) تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین از همکاری صمیمانه

مدیریت محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی و جناب آقای مهندس صادق صادقی کارشناس بخش مهندسی گلخانه مرکز بابت پشتیبانی علمی، فنی و مالی این آزمایش سپاسگزاری می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Abu-Hamdeh NH. 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems engineering*, 86(1): 97-102.
- Agrawal KK, Misra R, Yadav T, Agrawal GD and Jamuwa DK. 2018. Experimental study to investigate the effect of water impregnation on thermal performance of earth air tunnel heat exchanger for summer cooling in hot and arid climate. , *Renewable Energy*, 1(120): 255-265.
- Alam MR, Zain MFM, Kaish ABMA 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): 185-200.
- Aljubury IMA and Ridha HD. 2017. Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal energy. *Renew. Energy*, 111:321-331.
- Aranda-Arizmendi A, Rodríguez-Vázquez M, Jiménez-Xamán CM, Romero RJ and Montiel-González M. 2023. Parametric Study of the Ground-Air Heat Exchanger (GAHE): Effect of Burial Depth and Insulation Length. *Fluids*, 8(2): 40-50.
- Ascione F, Bellia L and Minichiello F. 2011. Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable Energy*, 36(8): 2177-2188.
- 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.
- Burton-Johnson A, Dziadek R. and Martin C .2020. Geothermal heat flow in Antarctica: current and future directions. *The Cryosphere*, 14(11): 3843-3873.
- Chaturvedi AK and. Bartaria VN. 2015. Performance of earth tube heat exchanger cooling of air, a review. *Int J Mech Eng Robotics Res*, 4(1): 378-382.
- Cuny M, Lin J, Siroux M, Magnenet V and Fond C. 2018. Influence of coating soil types on the energy of earth-air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 158: 1000-1012.
- Demir Z. 2019. Effects of vermicompost on soil physicochemical properties and lettuce (*Lactuca sativa* Var. Crispa) yield in greenhouse under different soil water regimes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(17):.2151-2168.
- Elminshawy NA, Siddiqui FR, Farooq QU and Addas MF. 2017. Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels. , *Applied Thermal Engineering*, 124:1319-1327.
- Faridi H, Arabhosseini A, Zarei, G. and Okos M. 2021. Degree-Day Index for Estimating the Thermal Requirements of a Greenhouse Equipped with an Air-Earth Heat Exchanger System. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(1), 83-95.
- Goodarzi M, Hydayatipour A and Ghadbeiklou J. 1402. The Feasibility of Underground Greenhouses Construction as an Action to Reduce Climate Change Impacts. *Drought and Climate Change Research*, 1(2):53-62.

- Gouda A. 2010. Using of geothermal energy in heating and cooling of agricultural structures. Ms. Thesis University of Benha, India
- Greco A and Masselli C. 2020. The optimization of the thermal performances of an earth to air heat exchanger for an air conditioning system: A numerical study. *Energies*, 13(23), 6414.
- 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.
- Lattieff FA, Atiya MA, Lateef RA, Dulaimi, A, Jweeg MJ, Abed AM and Talebizadehsardari P. 2022. Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study. *Frontiers in Built Environment*, 8: 1-13.
- 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.
- Lin J, Nowamooz H, Braymand S, Wolff P and Fond C. 2020. Impact of soil moisture on the long-term energy performance of an earth-air heat exchanger system". *Renewable Energy*, 147:2676-2687.
- Liu Z, Yu ZJ, Yang T, Li S, ElMankibi 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.
- Mahach H and Benhamou B. 2021. Study of the design of on earth- to- air heat exchanger for low energy air cooling and climate. heating of desert. In Aip conference proceeding, 2345(1), DOI: doi.org/10.1063/5.0049406
- Morshed W, Leso L, Conti L, Rossi G, Simonini S and Barbari, M. 2018. Cooling performance of earth-to-air heat exchangers applied to a poultry barn in semi-desert areas of south Iraq. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11:47-53.
- N'wuitcha K, Kolan Y, Nougblega Y, Banna M and Zeghmati B. 2022. Soil Nature Effect Investigation on the Ground-to-Air Heat Exchanger for the Passive Cooling of Rooms. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 12(4): 321-341.
- Sakhri N, Menni Y and Ameur H. 2020. Effect of the pipe material and burying depth on the thermal efficiency of earth-to-air heat exchangers. *Case Studies in Chemical and Environmental", Engineering*, 2: 10002-100013.
- Song XQ, Jiang Mand Qin P. 2019. Numerical investigation of the backfilling material thermal conductivity impact on the heat transfer performance of the buried pipe heat exchanger. In IOP Conference Series on Earth and Environmental Science, 267(4): 1-8.
- Williams GP and Gold LW. 1976. CBD-180 Ground Temperatures. National Research Council Canada, 100-101 National.