

مقاله پژوهشی

مطالعه تأثیر رطوبت خاک اطراف لوله مبدل حرارتی هوا-زمینی بر شاخص‌های عملکردی آن

ابوالفضل هدایتی پور^۱، محسن سلیمانی^{۲*} و مصطفی کیانی ده کیانی^۳

۱، ۲ و ۳- دانشجوی دکتری؛ و دانشیاران گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۴

چکیده

به منظور بررسی تأثیر رطوبت خاک و طول لوله انتقال هوا بر شاخص‌های عملکردی یک سامانه زمین گرمایی، دو آزمایش به صورت فاکتوریل در مرداد و شهریور ۱۴۰۱ بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در یک گلخانه مجهز به سامانه زمین گرمایی در شهر اراک اجرا شد. دو رطوبت خاک ۱۰ و ۲۵ درصد (a_1 و a_2) به عنوان فاکتور اول و سه طول لوله ۱۷، ۳۴ و ۵۱ متر (b_1 ، b_2 و b_3)، به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. توسط یک فن جریان هوا داخل دو لوله PVC به قطر ۲۰۰ میلی‌متر، در عمق سه متری زمین، به چرخش درمی‌آمد. برای مرطوب کردن خاک اطراف لوله، از یک نوار آبیاری به قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش رطوبت خاک از ۱۰ به ۲۵ درصد، دمای هوای خروجی سامانه از ۲۵/۵ به ۲۳/۵ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. متوسط راندمان در دو رطوبت ۲۵ و ۱۰ درصد به ترتیب ۸۲/۰ و ۶۹/۰ بود. توان سرمایشی تولید شده در دو سطح رطوبت مورد مطالعه خاک، به ترتیب ۲/۷ و ۲/۲ کیلووات بود. بهترین تیمار از نظر شاخص‌های عملکردی، تیمار با طول لوله ۳۴ متر و رطوبت ۲۵ درصد بود. دمای هوای خروجی، راندمان، توان سرمایشی و ضریب عملکرد سامانه در این حالت به ترتیب ۲۳/۷ درجه سلسیوس، ۹۰/۰، ۲/۸ کیلووات و ۳/۷ بود.

واژه‌های کلیدی

انرژی تجدیدپذیر، انرژی زمین گرمایی، سرمایش، گلخانه

مقدمه

زمین گرمایی در عمق سه تا پنج متری از سطح زمین، می‌تواند از گرما یا سرمای موجود در زمین (بسته به فصل)، در سرمایش و گرمایش واحدهای کشاورزی و مسکونی استفاده کرد (Bisoniya *et al.*, 2013). در این نوع سامانه، هوا با استفاده از دمنده داخل لوله به چرخش درمی‌آید و به واسطه اختلاف دمای هوا و زمین، تبادل انرژی بین دو محیط صورت می‌گیرد (Lin *et al.*, 2020).

دمای خاک در عمق سه تا پنج متری از

انرژی زمین گرمایی^۱ مانند انرژی خورشیدی و زیست‌توده^۲ یکی از منابع تجدیدپذیر و پاک محسوب می‌شود (Shingala & Patel, 2022). یکی از روش‌های استفاده از انرژی گرمایی زمین، به چرخش درآوردن هوا از طریق کانالی زیرزمینی است که اصطلاحاً مبدل حرارتی زمین گرمایی^۳ نامیده می‌شود. در سامانه مبدل زمین گرمایی هوایی، یک لوله انتقال هوا وجود دارد. با چرخش هوا در سامانه

<https://doi.org/10.22092/amr.2024.366145.1491>

1- Geothermal Energy

3- Earth-Air Heat Exchanger

Email: m.soleymani@scu.ac.ir

2- Biomass

*نگارنده مسئول:

است که جریان گرما در خاک را توصیف می‌کند و مقدار گرمایی است که در یک شیب حرارتی مشخص در واحد زمان از واحد سطح خاک عبور می‌کند (Hamdhan & Clarke, 2010). اندازه خاکدانه (ساختمان خاک)، بافت خاک، وزن مخصوص خاک و مقدار رطوبت موجود در خاک بر ضریب انتقال گرما تأثیرگذار است (Omer, 2018).

مقاومت حرارتی خاک خشک ۱۵ درصد کمتر از مقاومت حرارتی خاک مرطوب است و با افزایش رطوبت خاک این ضریب کاهش می‌یابد (Mukhtar *et al.*, 2017). با افزایش رطوبت خاک، بین ذرات خاکدانه‌ها که با هوا پر شده است با آب پر می‌شود و هدایت گرمایی خاک افزایش می‌یابد (Burton-Johnson *et al.*, 2020). در نتیجه، عملکرد سامانه حرارتی زمین گرمایی افزایش می‌یابد (Agrawal *et al.*, 2020). هرچه اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامه بیشتر باشد، کارایی سامانه بهتر خواهد شد. از این رو توصیه شده است بهترین زمان استفاده از این سامانه در گرم‌ترین ساعات روزهای تابستان و سردترین ساعات شب‌های فصل سرد باشد (Agrawal *et al.*, 2020). خاک اطراف لوله^۲ که به آن خاک دست‌نخورده^۳ نیز گفته می‌شود، تأثیر زیادی بر مقدار تبادل گرما بین محیط خاک و هوای داخل لوله دارد. استفاده از خاک شنی می‌تواند ضریب انتقال هوا را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد (Agrawal *et al.*, 2020). دمای هوای خروجی دمنده در حالت خاک مرطوب به میزان تقریباً ۱/۵ درجه سلسیوس خنک‌تر گزارش شده است (Morshed *et al.*, 2018). در آزمایشی در چین نشان داده شد با افزایش رطوبت حجمی خاک اطراف لوله از ۰/۳۷ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به ۰/۴۲ سانتی‌مترمکعب بر

سطح زمین در سراسر فصل تقریباً ثابت می‌ماند (Alam *et al.*, 2015). به عبارت دیگر دمای خاک در فصل تابستان در عمق سه تا پنج متر از سطح زمین، نسبت به دمای محیط کمتر و در فصل زمستان بیشتر است. کارایی سامانه در فصل گرم یا سرد بستگی به شرایط آب و هوایی منطقه دارد. نتایج تحقیقات در استان البرز نشان می‌دهد مقدار کاهش دما در فصل گرم در حدود ۱۸ درجه سلسیوس و مقدار افزایش دما در فصل سرد در حدود ۱۰ درجه سلسیوس بوده است، به عبارتی دیگر کارایی سامانه در فصل گرم بیشتر از کارایی آن در فصل سرد است (Faridi *et al.*, 2021). با توجه به مطالعات هسینی و همکاران (Hacini *et al.*, 2021) که تغییرات دمای خاک را در لایه‌های سطحی زمین در سه منطقه الجزایر بررسی کرده‌اند، بین دمای خاک و عمق زمین رابطه‌ای نمایی برقرار است.

تغییرات سالیانه دمای خاک در عمق سه متری از سطح زمین در حدود هفت تا هشت درجه سلسیوس است. این تغییرات در عمق پنج متری در حدود چهار تا پنج درجه سلسیوس و در عمق ۱۰ متری در حدود یک درجه سلسیوس گزارش شده است. شرایط فیزیکی و مقدار رطوبت خاک عامل مهمی در انتقال انرژی از محیط خاک به هوای داخل لوله به شمار می‌رود (Zhao *et al.*, 2019). بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات در استان البرز، کمترین و بیشترین اختلاف دمای خاک و محیط به ترتیب در دو عمق ۰/۳ و ۳ متری از سطح خاک دیده شده است. این محققان نتیجه گرفتند که عمق بهینه قراردهی لوله در مناطقی که احداث کانال هزینه زیادی دارد در حدود دو متر است (Faridi *et al.*, 2019). هدایت گرمایی^۱ پدیده‌ای

1- Thermal Conductivity
3- Undisturbed Soil

2- Backfilling Material (BFM)

تغییری در دمای هوای در حال چرخش به وجود نمی‌آید. به این طول اصطلاحاً طول اشباع^۱ می‌گویند (Maoz *et al.*, 2019). بر اساس مطالعات، توان سرمایشی تولید شده در ساعات ۱۰ صبح تا ۶ بعدازظهر، دو برابر توان سرمایشی تولید شده در ساعات اولیه صبح است. در گرم‌ترین ساعات روز، تغییرات دمای هوای ورودی تأثیری بر مقدار دمای هوای خروجی ندارد (Liu *et al.*, 2019).

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر طول لوله انتقال هوا، رطوبت خاک و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص‌های عملکردی مبدل حرارتی زمین-گرمایی در شرایط آب و هوایی استان مرکزی است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر رطوبت خاک (بر اساس وزن خشک خاک) بر شاخص‌های عملکردی سامانه زمین‌گرمایی، دو آزمایش به صورت فاکتوریل در تابستان ۱۴۰۱ بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی نوع تونلی قوسی^۲ در ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی واقع در شهر اراک اجرا شد که مجهز به تجهیزات سامانه زمین‌گرمایی بود. گلخانه آزمایشی دو کانال داشت، یکی از کانال‌ها برای حالتی در نظر گرفته شد که خاک اطراف لوله نسبتاً خشک بود (رطوبت ۱۰ درصد). کانال دیگر برای حالتی در نظر گرفته شد که رطوبت خاک اطراف لوله در حدود ۲۵ درصد باشد. دو رطوبت خاک، $a_1=10$ و $a_2=25$ درصد، به عنوان فاکتور اول و سه طول لوله به اندازه‌های ۱۷، ۳۴ و ۵۱ (b₁، b₂ و b₃) متر، به عنوان فاکتور دوم در هر دو آزمایش در نظر گرفته شد (رطوبت خاک در محدوده ۱۰ تا ۱۱ درصد بود). آزمایش شماره یک در اواسط مرداد و آزمایش شماره دو در اواسط

سانتی‌مترمکعب (با استفاده از آبیاری قطره‌ای)، دمای خروجی سامانه به اندازه ۱/۶ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد (Li *et al.*, 2019). طول و قطر و جنس لوله انتقال هوا، سرعت هوا و دمای ورودی از دیگر عوامل تأثیرگذار بر کارایی سامانه زمین‌گرمایی هستند (Cuny *et al.*, 2020). نتایج مطالعات نشان داده است که جنس لوله کمترین تأثیر را بر دمای خروجی هوا دارد. در حالی که طول لوله تأثیر زیادی بر دمای خروجی لوله دارد (Sakhri *et al.*, 2022). با توجه به نتایج مطالعات در ایالت پنجاب هند (آب و هوای گرم)، طول بهینه لوله انتقال هوا در حدود ۳۰ متر است. قطر بهینه لوله در این آزمایش‌ها ۲۰ سانتی‌متر گزارش شده است (Singh *et al.*, 2018). برخی محققان طول ۳۰ تا ۵۰ متر را توصیه کرده‌اند (Belatrache *et al.*, 2017).

محققان پاکستانی تأثیر سه عامل طول و قطر لوله و سرعت هوای داخل لوله را بر عملکرد سامانه زمین‌گرمایی برای محیط مسکونی بررسی کردند و نشان دادند که بهترین شاخص‌های عملکردی سامانه در طول ۵۰ تا ۷۰ متر، قطر ۱۸ تا ۲۵ سانتی‌متر و سرعت ۵ تا ۷ متر بر ثانیه به دست می‌آید (Darius *et al.*, 2017). با افزایش طول لوله انتقال هوا، سطح تماس لوله با هوای در حال حرکت افزایش خواهد یافت و در نتیجه میزان تبادل انرژی بین محیط خاک و هوای داخل لوله بهبود می‌یابد (Ben Jmaa Derbel & Kanoun, 2010). مطالعات نشان می‌دهند ۸۲ تا ۸۵ درصد ظرفیت پیش‌گرمایش یا پیش‌سرمایش، در ۳۴ متر اولیه لوله (از محل دمیده) اتفاق می‌افتد (Darius *et al.*, 2017). نتایج مطالعات همچنین نشان می‌دهند که دمای هوای داخل لوله تا طول مشخصی نسبت به دمای محیط تغییر می‌کند، با افزایش بیشتر طول لوله، هیچ‌گونه

1- Saturation Length

2- Quonset Greenhouse

شهریور ۱۴۰۱ (به ترتیب اوایل جولای و سپتامبر ۲۰۲۲) اجرا شد. 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 هوا در شهر اراک ۱۳/۸ درجه سلسیوس است و مرداد با میانگین دمای ۲۷ درجه سلسیوس گرم‌ترین ماه، و بهمن با میانگین دمای ۰/۳ درجه سلسیوس سردترین ماه سال است. مشخصات گلخانه آزمایشی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات گلخانه آزمایشی
Table 1- Properties of the Experimental Greenhouse

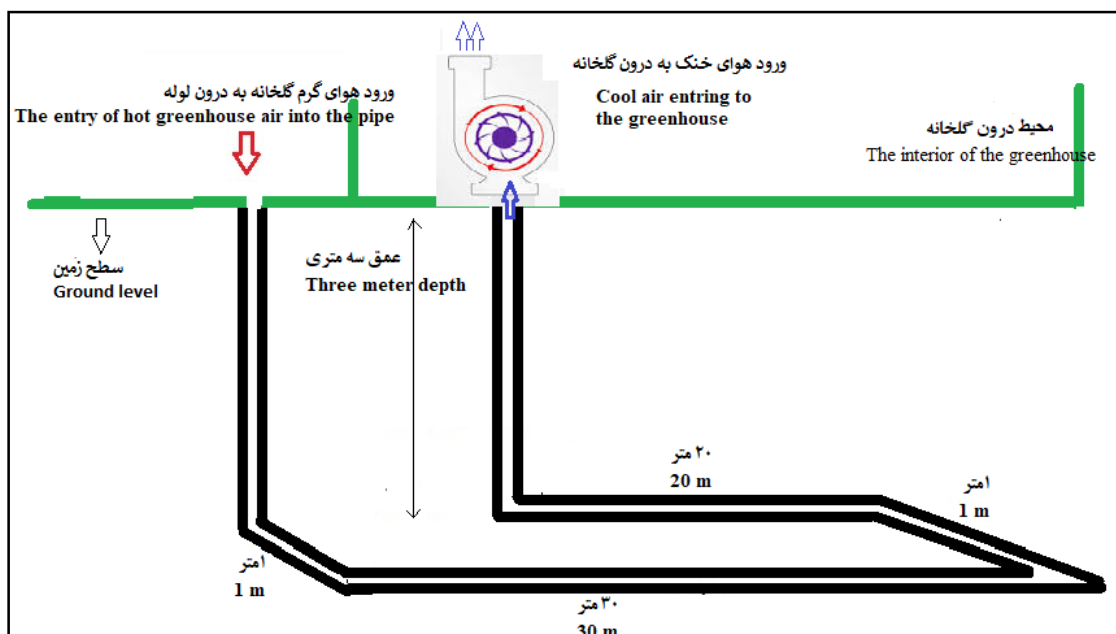
پوشش گلخانه Greenhouse Cover	جهت گلخانه Greenhouse Orientation	ارتفاع (متر) Height	عرض (متر) Width (m)	طول (متر) Length (m)	مساحت (مترمربع) Area (m ²)	نوع گلخانه Greenhouse Type
پلاستیک تک لایه Single-layer Plastic	شرقی- غربی East-West	3.5	10	15	150	تونلی- قوسی Quonset

بافت خاک محل آزمایش شنی-لومی بود با مقدار رس، سیلت و شن به ترتیب ۱۹، ۲۵ و ۵۶ درصد. مشخصات سامانه پمپ حرارتی زمینی نیز در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات پمپ حرارتی هوا-زمینی
Table 2- Properties of the EAHE system

نوع دمنده و توان Fan Type and its Power	نحوه چرخش هوا Air Circulation Method	عمق لوله Pipe Burial Depth (m)	قطر لوله Pipe Diameter (m)	طول لوله Pipe Length (m)	جنس لوله Pipe Material
گریز از مرکز (شکل ۱)، 0.76 کیلووات Centrifugal – 0.76 kw (Fig. 1)	چرخش حلقه باز Open loop	3	0.2	50	PVC

دلیل اصلی استفاده از لوله پی‌وی‌سی، ارزان تر بودن آن در مقایسه با انواع دیگر لوله است. از سوی دیگر، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که جنس لوله تأثیر زیادی بر عملکرد سامانه زمین‌گرمایی ندارد (Sakhri et al., 2022). گلخانه به صورت طولی (شرقی- غربی) با دیواره پلاستیک به دو قسمت ۷۵ مترمربعی تقسیم شد. به این صورت که ارزیابی هریک از سامانه‌ها (سامانه با رطوبت خاک ۲۵ درصد و سامانه با رطوبت خاک ۱۰ درصد) در دو محیط مجزا اجرا گردید. شکل ۱، شماتیکی از نحوه چرخش هوا در درون زمین و گلخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره مسیر چرخش هوا در یکی از کانال‌ها (کانال دوم در طرف دیگر گلخانه به همین شکل احداث شده است)

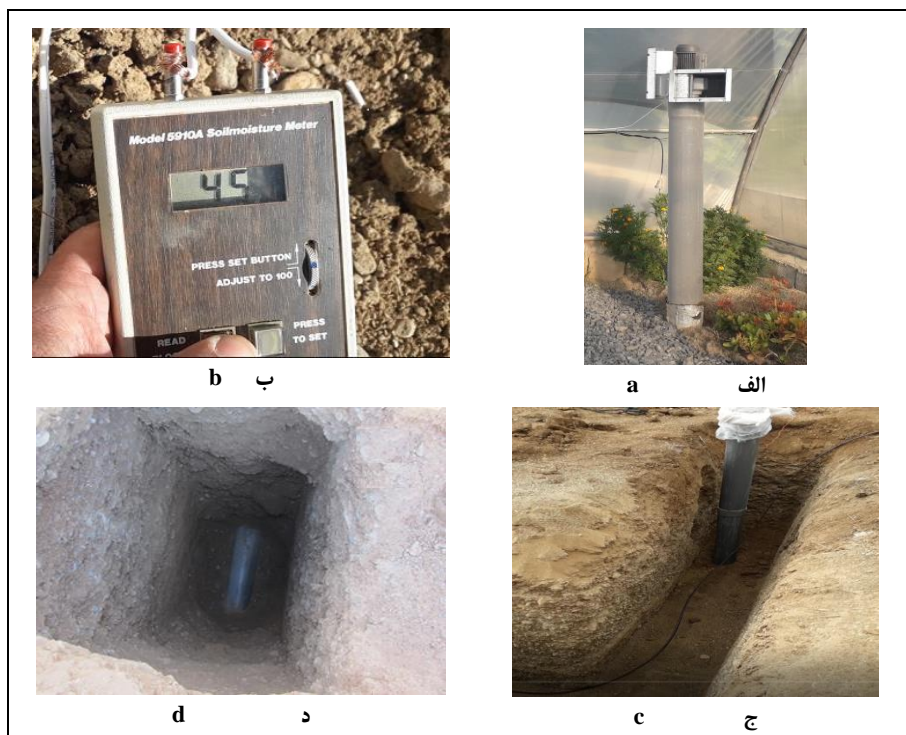
Fig. 1- A schematic view of air circulation path of the air circulation in one of the channels (the second channel is built in the same way on the other side of the greenhouse)

دستگاه سرعت‌سنج هوا ساخت شرکت AZ کشور چین (مدل ۸۹۰۲) استفاده گردید. سرعت هوای داخل لوله پنج متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (Maoz *et al.*, 2019). برای اندازه‌گیری دمای هوای دستگاه دیتالاگر تک‌کانال^۱ استفاده شد. دمای هوای ورودی به سامانه، دمای خاک، دمای هوای ورودی سامانه و دمای خروجی سامانه در تیمارهای آزمایش به فاصله‌های زمانی ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۲-d). در فاصله‌های ۱۷ و ۳۴ متری از محل ورودی هوا، دو چاهک به عمق ۳ متر حفر شد. با ایجاد یک حفره روی لوله و اتصال آن به لوله عمودی به قطر ۱۰ سانتی‌متر، امکان قراردادی دیتالاگر در مسیر عبور هوا فراهم گردید.

داده‌های ذخیره شده از طریق نرم‌افزار مخصوص دیتالاگر، به محیط اکسل منتقل شد. مشخصات دیتالاگر مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است.

برای آگاهی از مقدار رطوبت خاک در خلال آزمایش، در اطراف هر لوله دو بلوک گچی قرار داده شد. سیم‌های متصل به بلوک گچی با یک لوله پی‌وی‌سی به قطر ۵ سانتی‌متر به قسمت سطحی خاک هدایت شدند و رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج مدل A5910، ساخت شرکت Soil Moisture خوانده شد (شکل ۲-b). رطوبت چندین نمونه خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد و دستگاه بر اساس مقادیر رطوبت به دست آمده کالیبره گردید. رطوبت خاک اطراف لوله در حدود ۱۰ درصد بود و از این‌رو این کانال به عنوان تیمار با رطوبت ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. در کانال دوم و در مجاورت لوله انتقال هوا، به منظور افزایش رطوبت وزنی خاک تا سطح ۲۵ درصد، یک نوار آبیاری حاوی قطره‌چکان به قطر ۱۶ میلی‌متر در فاصله ۱۵ سانتی‌متری بالای لوله قرار داده شد (شکل ۲-c). برای اندازه‌گیری سرعت هوا از یک

1- Single Channel Data Logger



شکل ۲- الف) دمنده هوا، ب) اندازه‌گیری رطوبت خاک، ج) لوله آبیاری در اطراف لوله و د) حفر چاهک برای قراردگی دیتالاگر
 Fig. 2- a) Air centrifugal blower, b) Measuring soil moisture, c) Placing an irrigation tape adjacent to the air transferring pipe, and d) a manifold dugged for datalogger installation

جدول ۳- خصوصیات فنی دیتالاگر

Table 3- Data Logger Technical Specifications

China	چین	Country of Manufacture	کشور سازنده
Gm1365		Model	مدل
0.3°C		Temperature Measuring Accuracy	دقت اندازه‌گیری دما
From -30°C to 80°C		Temperature measuring Range	محدوده اندازه‌گیری دما
32000 Data		Memory Capacity	ظرفیت حافظه

آزمایش تقریباً ثابت بود. مدت زمان اجرای هر تیمار، دو شبانه‌روز در نظر گرفته شد (هر تکرار، دو شبانه‌روز). در این آزمایش، مطالعه عملکرد سامانه در گرم‌ترین ساعت روز مدنظر بوده است. میانگین دمای هوای ورودی در گرم‌ترین ساعات روز در دو محدوده زمانی اجرای آزمایش، به ترتیب ۴۰/۵ و ۳۵/۵ درجه سلسیوس بود (بین ساعات ۱۲ تا ۱۸). علاوه بر اندازه‌گیری دمای خروجی سامانه در هر تیمار، راندمان، توان سرمایشی تولیدشده و ضریب عملکرد سامانه^۱ در هر تیمار محاسبه گردید.

با قرار دادن دیتالاگر در عمق سه متری (از طریق لوله مجزا)، دمای خاک نیز در طول هر دو آزمایش ثبت شد. در هر دو بازه زمانی آزمایش، هر دو سامانه (رطوبت خاک ۱۰ و ۲۵ درصد) به صورت شبانه‌روزی کار می‌کردند. چون هدف بررسی تأثیر هر دو عامل بر شاخص‌های عملکردی در گرم‌ترین ساعات شبانه‌روز بود، میانگین دمای گرم‌ترین ساعات روز (بین ساعات ۱۴ تا ۱۷) به عنوان دمای هوای ورودی دمنده در نظر گرفته شد. نوسان‌های دمایی (روزانه) در این ساعات در هریک از بازه‌های زمانی

راندمان سامانه

راندمان سامانه از رابطه ۱ محاسبه شد (Sakhri et al., 2022).

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

که در آن،

η = راندمان سامانه؛ T_{out} = دمای هوای خروجی دمنده (درجه سلسیوس)؛ T_{in} = دمای هوای ورودی دمنده و در واقع دمای محیط (درجه سلسیوس)؛ و T_{soil} = دمای خاک (درجه سلسیوس).

توان سرمایشی

توان سرمایشی تولید شده با استفاده از رابطه ۲ به دست آمد (Sakhri et al., 2022).

$$Q_c = \dot{m} C \rho_{air} (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

که در آن،

Q_c = توان سرمایشی زمین گرمایی (کیلووات)؛ \dot{m} = دبی جریان هوا (کیلوگرم بر ثانیه)؛ T_{out} = دمای هوای خروجی دمنده (درجه سلسیوس)؛ T_{in} = دمای هوای ورودی دمنده (درجه سلسیوس)؛ C = گرمای ویژه هوا (کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)؛ و ρ_{air} = جرم مخصوص هوا (کیلوگرم بر مترمکعب)

ضریب عملکرد سامانه

ضریب عملکرد سامانه با استفاده از رابطه ۳ به دست آمد (Sakhri et al., 2022).

$$COP = \frac{Q_c}{W} \quad (3)$$

که در آن،

COP = ضریب عملکرد سامانه (بدون واحد)؛ Q_c = توان سرمایشی زمین گرمایی (کیلووات)؛ و W = توان مصرفی الکتروموتور برای چرخش دمنده (کیلووات).

تجزیه واریانس اثر عوامل بر شاخص‌های

اندازه‌گیری شده و مقایسه میانگین شاخص‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن با نرم‌افزار mstat-C به دست آمد.

نتایج و بحث

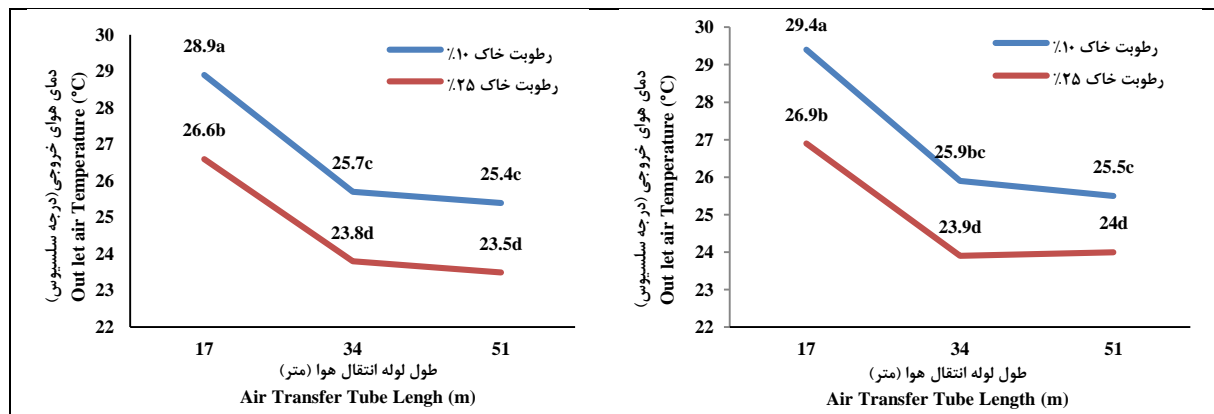
نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر رطوبت خاک و طول لوله بر دمای هوای خروجی، راندمان، ضریب عملکرد و توان سرمایشی تولید شده سامانه در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. برهم‌کنش این دو عامل بر صفات در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار نیست. به بیان دیگر، اثر رطوبت خاک در هر سه طول لوله بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده تفاوت معنی‌داری ندارد.

اثر تیمارها بر دمای خروجی سامانه

شکل ۳، تغییرات دمای هوای خروجی سامانه در دو سطح رطوبت خاک اطراف لوله و سه سطح طول لوله انتقال هوا را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش رطوبت خاک در هر دو آزمایش، دمای هوای خروجی سامانه کاهش داشته است و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار بوده است (تیمارهای با حروف مشابه از نظر آماری تفاوت معنی‌داری ندارند). با افزایش طول لوله از ۱۷ متر به ۳۴ متر، دمای هوای در حال چرخش درون لوله‌ها ۳ تا ۳/۵ درجه سلسیوس کاهش یافته است. دلیل اصلی این موضوع افزایش ضریب انتقال گرما به واسطه افزایش رطوبت خاک است (Sakhri et al., 2022). میانگین دمای هوای خروجی سامانه در دو سطح رطوبت خاک ۲۵ و ۱۰ درصد در هر دو آزمایش به ترتیب ۲۴/۷ و ۲۶/۷ درجه سلسیوس است. با افزایش رطوبت خاک، فضای خالی بین خاکدانه‌ها با آب پر می‌شود (Li et al., 2019). از آنجا که ضریب انتقال گرمای سیال آب، در مقایسه با هوا و ذرات خاک، بیشتر

حدود ۱۰ درجه سلسیوس بود، دمای هوای خروجی سامانه در هر دو آزمایش تقریباً ثابت است. نتایج تحقیقات دیگر محققان (Liu *et al.*, 2019) نیز نشان داده است که در گرم‌ترین ساعات روز تغییر دمای محیط اثری بر دمای خروجی سامانه ندارد.

است، انتقال گرما از هوای داخل لوله به محیط خاک سرعت بیشتری دارد و در نتیجه دمای هوای خروجی نسبت به حالتی که رطوبت خاک اطراف لوله کمتر است، کاهش بیشتری نشان می‌دهد (Morshed *et al.*, 2018). به رغم اینکه اختلاف دمای هوا در گرم‌ترین ساعات روز در دو آزمایش در



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر رطوبت خاک و طول لوله انتقال هوا بر دمای خروجی سامانه، آزمایش اول (شکل راست) و آزمایش دوم (شکل چپ)

Fig. 3- Means comparison of soil moisture and air transferring pipe length on outlet air temperature, first experiment (right) and second experiment (left)

و در نتیجه میزان انتقال انرژی به روش هدایت افزایش خواهد یافت (Ben Jmaa Derbel & Kanoun, 2010; Kaddour *et al.*, 2022; Sakhri *et al.*, 2022). انتقال حرارت از خاک به هوای در حال حرکت، یا بالعکس، به واسطه شیب حرارتی دمای دو محیط خاک و هوای درون لوله است. بعد از طول مشخصی از لوله، با توجه به اینکه دمای هوای داخل لوله تقریباً به مقداری ثابت رسیده است، تبادل انرژی بین دو محیط خاک و هوای داخل لوله به حالت تعادل می‌رسد و عملاً هیچ‌گونه تبادل حرارتی بین دو محیط صورت نمی‌گیرد (Li *et al.*, 2019).

با توجه به شکل ۳، دمای هوای خروجی از طول ۳۴ متر به بعد تقریباً ثابت است. به عبارت دیگر، طول اشباع لوله در این سامانه ۳۴ متر است (Darius *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2021)

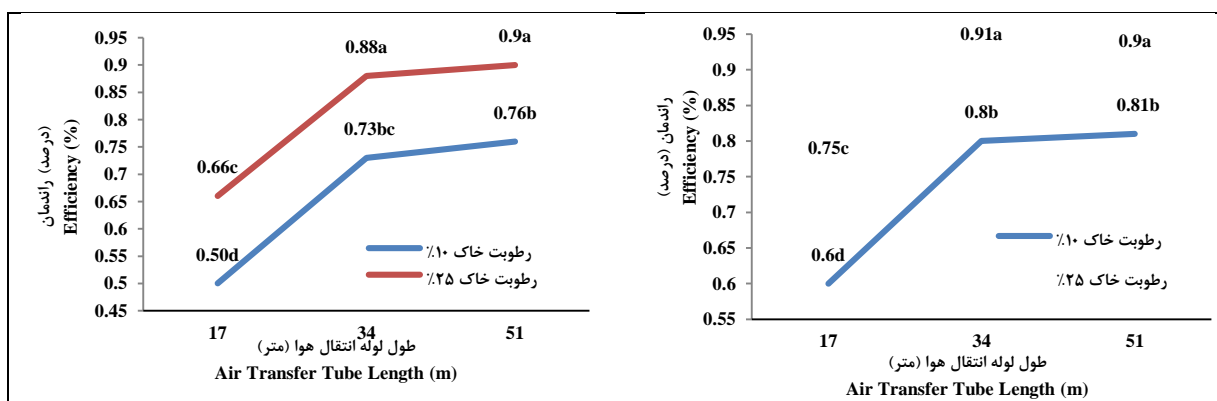
افزایش طول لوله از ۳۴ به ۵۱ متر در هر دو سطح رطوبت خاک باعث کاهش معنی‌دار دمای هوای درون لوله‌ها نشد. بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۳، میانگین دمای هوای خروجی سامانه در تیمارهایی که طول انتقال هوا ۵۱ و ۳۴ متر است به ترتیب ۲۴/۸ و ۲۴/۳ درجه سلسیوس است و اختلاف مشاهده شده در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار نیست. میانگین دمای هوای خروجی در تیمارهایی با طول لوله ۱۷ متر در حدود ۲۷/۹ درجه سلسیوس است که اختلاف آن با دمای هوای خروجی در دو طول دیگر در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. در هر دو آزمایش، کمترین دمای هوای خروجی سامانه در دو سطح رطوبتی خاک در حالتی مشاهده شد که طول لوله انتقال هوا ۱۷ متر است. دلیل این موضوع آن است که با افزایش طول لوله، سطح تماس محیط خاک و هوا افزایش می‌یابد

تأثیر تیمارهای آزمایش بر راندمان سامانه

شکل ۴، تغییرات راندمان سامانه در دو رطوبت اطراف خاک و سه طول لوله در دو آزمایش را نشان می‌دهد. مطابق رابطه ۱، راندمان سامانه با شیب حرارتی دمای هوای خروجی به دمای هوای ورودی سامانه، نسبت مستقیم و با شیب حرارتی دمای خاک به دمای هوای ورودی نسبت عکس دارد. با افزایش رطوبت خاک اطراف لوله، دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد، در نتیجه شیب حرارتی دمای هوای ورودی و خروجی سامانه افزایش خواهد یافت و در نهایت راندمان سامانه نیز افزایش می‌یابد. متوسط راندمان سامانه در رطوبت خاک ۲۵ درصد، در مقایسه با رطوبت خاک ۱۰ درصد در آزمایش یک به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۷۳ و در آزمایش دو به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۶ است (Li et al., 2019; Morshed et al., 2018).

با توجه به شکل ۴، مانند آنچه برای دمای هوای خروجی سامانه مشاهده شد (شکل ۳)، اختلاف راندمان سامانه نیز در دو طول ۳۴ و ۵۱ متر (با

مقادیر ۰/۸۴ و ۰/۸۳) در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار نیست. با این حال اختلاف میانگین راندمان سامانه در دو طول لوله ۱۷ متری و ۳۴ متری در هر دو سطح رطوبتی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. دلیل اصلی این روند بیشتر بودن شیب حرارتی دمای هوای ورودی و خروجی (اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی) در دو طول ۳۴ و ۵۱ متر، در مقایسه با طول لوله ۱۷ متر، است (Ben Jmaa Derbel & Kanoun, 2010). میانگین راندمان سامانه در دو بازه زمانی اجرای آزمایش به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۳ است. دمای هوای ورودی سامانه در آزمایش یک (اواسط مرداد)، در مقایسه با آزمایش دو (اواسط شهریور)، در حدود پنج درجه سلسیوس بیشتر است. در نتیجه شیب حرارتی دمای هوای ورودی و خروجی سامانه در آزمایش یک، در مقایسه با آزمایش دو، بیشتر بوده است که باعث افزایش راندمان سامانه شده است (Agrawal et al., 2020).



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر رطوبت خاک و طول لوله انتقال هوا بر راندمان سامانه، آزمایش اول (سمت راست) و آزمایش دوم (سمت چپ)

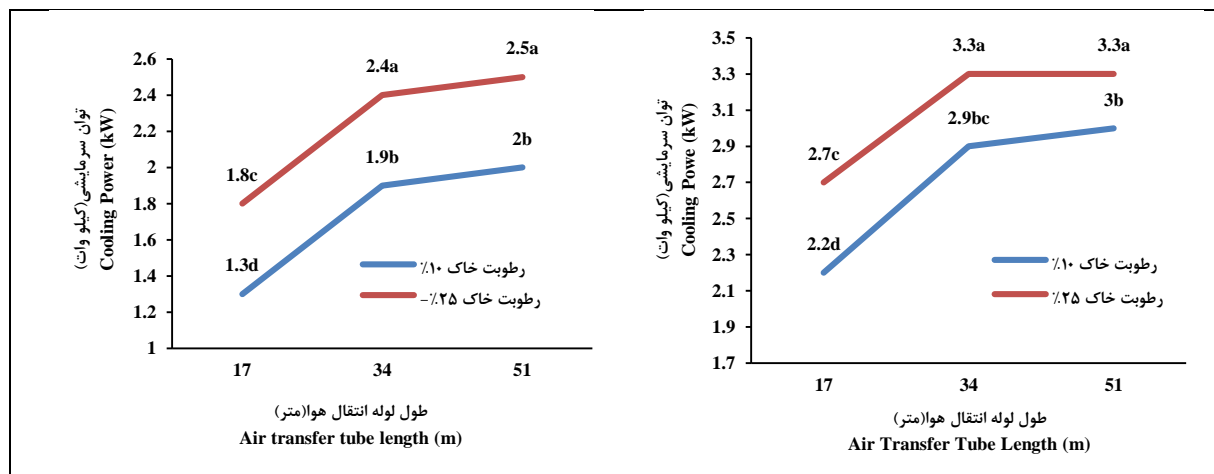
Fig. 4- Means comparison of soil moisture and air transferring pipe length on the system efficiency first experiment (right) and second experiment (left)

متوسط توان سرمایشی تولید شده سامانه در رطوبت خاک ۲۵ درصد و رطوبت خاک ۱۰ درصد در آزمایش اول، به ترتیب ۳/۱ و ۲/۷ کیلووات و در

تأثیر تیمارهای آزمایش بر توان سرمایشی تولید شده شکل ۵، اثر فاکتورهای آزمایش بر توان سرمایشی تولید شده سامانه را نشان می‌دهد.

آن است که دمای هوای خروجی در دو طول ۳۴ و ۵۱ متر تقریباً یکسان است و مقادیر دمای هوای خروجی در دو طول یاد شده کمتر از دمای هوای ورودی در طول ۱۷ متر است. در نتیجه، شیب حرارتی دمای هوای ورودی و خروجی سامانه از طول ۳۴ متر به بعد افزایش می‌یابد. اختلاف میانگین توان سرمایشی تولید شده در آزمایش اول (با دمای هوای ورودی ۴۰/۵ درجه سلسیوس) با آزمایش دوم (با دمای هوای ورودی ۳۵/۵ درجه سلسیوس) در حدود یک کیلووات است (Li *et al.*, 2019). دلیل اصلی این موضوع افزایش شیب حرارتی (اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه) در آزمایش اول است که در نهایت، باعث افزایش توان سرمایشی در بازه زمانی آزمایش اول، در مقایسه با آزمایش دوم، شده است (Agrawal *et al.*, 2020).

آزمایش دوم به ترتیب ۲/۲ و ۱/۷ کیلووات به دست آمد (Li *et al.*, 2019; Morshed *et al.*, 2018). بر اساس رابطه (۲)۲، عامل اصلی در مقدار توان سرمایشی سامانه همانند شاخص راندمان، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه است (Sakhri *et al.*, 2022). به همین دلیل توان سرمایشی تولید شده با افزایش طول لوله و مقدار رطوبت اطراف خاک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۵، میانگین توان سرمایشی تولید شده در سه طول ۳۴، ۵۱ و ۱۷ متر به ترتیب ۲/۷، ۲/۶ و ۲ کیلووات است. اختلاف توان سرمایشی در تیمارهای با طول لوله ۵۱ و ۳۴ متر، در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار نیست، با این حال، اختلاف توان سرمایشی در تیمارهای با طول لوله ۳۴ و ۱۷ متر در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. دلیل این موضوع

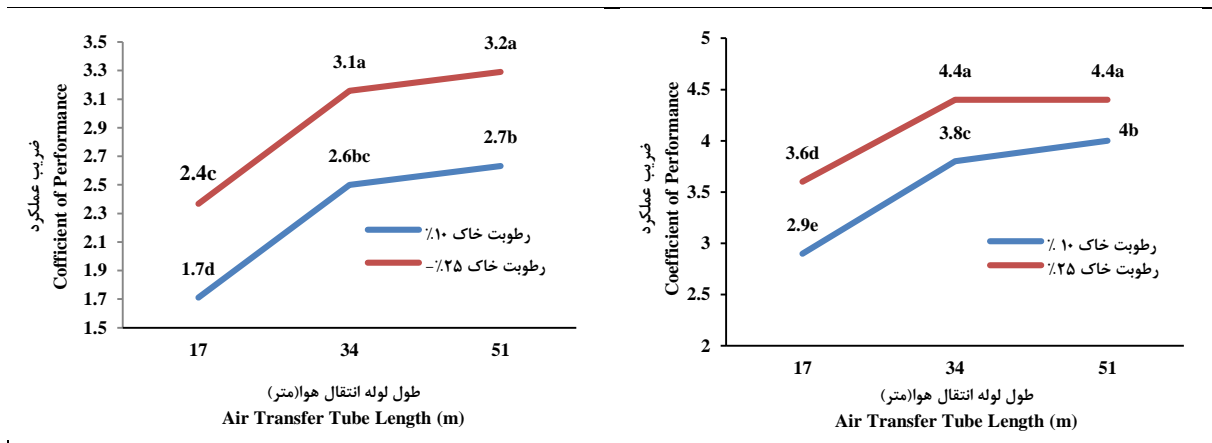


شکل ۵- مقایسه میانگین اثر رطوبت خاک و طول لوله انتقال هوا بر توان سرمایشی تولید شده، آزمایش اول (شکل راست) و آزمایش دوم (شکل چپ)

Fig. 5- Means comparison of the effect of soil moisture and air transferring pipe length on produced cooling power, first experiment (right) and second experiment (left)

سامانه مطابق رابطه ۳ حاصل تقسیم توان سرمایشی تولیدشده به توان مصرفی موتور الکتریکی دمنده است، تغییرات این شاخص دقیقاً مشابه تغییرات توان سرمایشی تولید شده است.

تأثیر تیمارهای آزمایش بر ضریب عملکرد سامانه شکل ۶، تغییرات ضریب عملکرد سامانه، متأثر از مقدار رطوبت خاک اطراف لوله و طول لوله انتقال هوا را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ضریب عملکرد



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر رطوبت خاک و طول لوله انتقال هوا بر ضریب عملکرد سامانه، آزمایش اول (سمت راست) و آزمایش دوم (سمت چپ)

Figure 6- Means comparison of the effect of Soil moisture and air transfer tube length on Coefficient of Performance first experiment (right) and second experiment (left)

در هر دو زمان اواسط مرداد و شهریور تقریباً یکسان است. با این حال، با توجه به اینکه دمای هوا در اواسط مرداد (آزمایش اول) در مقایسه با شهریور (آزمایش دوم) در حدود پنج درجه سلسیوس بیشتر است، شیب حرارتی اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی افزایش می‌یابد که در نتیجه راندمان، توان سرمایشی تولید شده و ضریب عملکرد سامانه نیز افزایش خواهد یافت. به عبارت دیگر، هرچه میزان اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی بالاتر رود، شاخص‌های راندمان و توان سرمایشی نیز بیشتر می‌شود. نتایج تحقیق نشان داد که بهترین عملکرد سامانه در گرم‌ترین ساعات تابستان با طول لوله ۳۴ متر و رطوبت خاک ۲۵ درصد به دست می‌آید. در این شرایط، دمای هوای خروجی ۲۳/۷ درجه سلسیوس، راندمان سامانه ۰/۹۰، توان سرمایش ۲/۴ کیلووات و ضریب عملکرد سامانه ۳/۷ است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، با افزایش رطوبت خاک از ۱۰ درصد به ۲۵ درصد، دمای خروجی سامانه در حدود دو درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. با کم شدن دمای خروجی، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سامانه افزایش و در نتیجه راندمان، توان سرمایشی و ضریب عملکرد سامانه نیز افزایش می‌یابد. در رطوبت خاک ۲۵ درصد، افزایش طول لوله انتقال هوا در زیرزمین از ۱۷ متر به ۳۴ متر باعث کاهش معنی‌دار دمای هوای خروجی (در حدود ۳ درجه سلسیوس)، افزایش معنی‌دار راندمان سامانه (در حدود ۲۰ درصد)، افزایش COP (۰/۶ تا ۰/۹) و افزایش توان سرمایشی تولید شده (۰/۶ تا ۰/۷ کیلووات) می‌شود. دمای خروجی سامانه از طول ۳۴ متر به بعد تقریباً ثابت است. به عبارت دیگر، طول اشباع سامانه در حدود ۳۴ متر است. دمای خروجی سامانه

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Agrawal, K. K., Misra, R., & Agrawal, G. D. (2020). Experimental study to investigate the effect of backfilling materials on thermal performance of ground air heat exchanger system. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(2), <https://doi.org/10.1115/1.4044176>.
- Alam, M. R., Zain, M. F. M., Kaish, A. B. M. A., & 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. <https://doi.org/10.1177/1420326X13507591>.
- Belatrache, D., Bentouba, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.221>.
- Ben Jmaa Derbel, H., & Kanoun, O. (2010). Investigation of the ground thermal potential in tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), 1091-1100. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.022>.
- Bisoniya, T. S., Kumar, A., & Baredar, P. (2013). Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 238-246. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.023>.
- Burton-Johnson, A., Dziadek, R., & Martin, C. (2020). Review article: Geothermal heat flow in Antarctica: Current and future directions. *Cryosphere*, 14(11), 3843-3873. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3843-2020>.
- Cuny, M., Lapertot, A., Lin, J., Kadoch, B., & Le Metayer, O. (2020). Multi-criteria optimization of an earth-air heat exchanger for different French climates. *Renewable Energy*, 157, 342-352. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.115>.
- Darius, D., Misaran, M. S., Rahman, M. M., Ismail, M. A., & Amaludin, A. (2017). Working parameters affecting earth-air heat exchanger (EAHE) system performance for passive cooling: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 217(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/217/1/012021>.
- Faridi, H., Arabhosseini, A., Zarei, G., & Okos, M. (2019). Utilization of soil temperature modeling to check the possibility of earth-air heat exchanger for agricultural building. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 10(4), 260-268. <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.04.06>.
- Faridi, H., Arabhosseini, A., Zarei, G., & 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. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i1.86233>. (in Persian)
- Hacini, K., Benatallah, A., Harrouz, A., & Belatrache, D. (2021). Efficiency assessment of an earth-air heat exchanger system for passive cooling in three different regions - the Algerian case. *FME Transactions*, 49(4), 1035-1046. <https://doi.org/10.5937/FME2104035H>.
- Hamdhan, I. N., & Clarke, B. G. (2010). Determination of thermal conductivity of coarse and fine sand soils. *In Proceedings of the World Geothermal Congress*. April 25-29, Bali, Indonesia.
- Kaddour, A., Attia, M. E. H., Arici, M., Benbelgacem, K., & Driss, Z. (2022). A numerical evaluation on the utilization of Earth to Air Heat Exchangers in arid regions Algeria. *Journal of Thermal Engineering*, 8(4), 505-514. <https://doi.org/10.18186/thermal.1150003>.
- Li, H., Ni, L., Yao, Y., & Sun, C. (2019). Experimental investigation on the cooling performance of an Earth

- to Air Heat Exchanger (EAHE) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. *Energy and Buildings*, 196, 280-292. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.05.007>.
- Lin, J., Nowamooz, H., Braymand, S., Wolff, P., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.106>.
- Liu, Z., Yu, Z. J., Yang, T., Li, S., Mankibi, M. E., Roccamena, L., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.506>.
- Maoz, A. S., Muhammad, N., Amin, A., Sohaib, M., Basit, A., & Ahmad, T. (2019). Parametric optimization of Earth to Air Heat Exchanger using Response Surface Method. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113186>.
- Morshed, W., Leso, L., Conti, L., Rossi, G., Simonini, S., & 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(3), 47-53. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3047>.
- Mukhtar, A., Yusoff, M. Z., & Ching, N. K. (2017). *An empirical estimation of underground thermal performance for Malaysian climate. Journal of Physics: Conference Series*, 949, 4th International Conference on Mathematical Applications in Engineering (ICMAE'17), Aug. 8-9, International Islamic University Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/949/1/012011>.
- Omer, A. (2018). *Soil thermal properties: Effects of density, moisture, salt concentration and organic matter*. In A. Kallel (Ed.), *Advances in science, technology and innovation*. Springer International Publishing AG 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4_39.
- Sakhri, N., Menni, Y., & 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. <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.31237.1843>.
- Shingala, N. R., & Patel, C. M. (2022). *Mathematical Analysis of Earth Air Heat Exchanger (EAHE) for Storage system. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Engineering and Technology*. Oct. 5-6. Peshawar, Pakistan.
- Singh, R., Sawhney, R. L., Lazarus, I. J., & Kishore, V. V. N. (2018). Recent advancements in Earth Air Tunnel Heat Exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(May), 2162-2185. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.058>.
- Singh, B., Asati, A. K., & Kumar, R. (2021). Evaluation of the cooling potential of earth air heat exchanger using concrete pipes. *International Journal of Thermophysics*, 42(2), 19. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02774-w>.
- Zhao, Y., Li, R., Ji, C., Huan, C., & Zhang, B. (2019). Parametric study and design of an earth-air heat exchanger using model experiment for memorial heating and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 148, 838-845. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.018>.

Research Paper

Investigating the effect of Soil Moisture Around the Pipe in an Earth–Air Heat Exchanger (EAHE) System on its Performance Indicators

A. Hedayatipour, M. Soleimani* and M. Kiani Deh-Kiani

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.soleimani@scu.ac.ir

Received: 21 June 2024, Accepted: 4 September 2024

<https://doi.org/10.22092/amsr.2024.366145.1491>

Abstract

In order to investigate the effect of soil moisture and air transfer tube length on the performance indicators of a geothermal system, two factorial experiments were conducted based on a complete randomized block design in three replications in a greenhouse equipped with Earth–Air Heat Exchanger(EAHE)system located in the city of Arak in early August and September 2022. Two soil moisture levels, $a_1=10\%$ and $a_2=25\%$, were considered as the first factor and three pipe lengths of $b_1=17$, $b_2=34$, and $b_3=51$ m, were considered as the second factor in both experiments. The air was circulated by a fan through two PVC pipes with a diameter of 200 mm, which were buried at three meters deep from the ground surface. An irrigation tape with a diameter of 16 mm was used to increase the soil moisture around the pipe. The results showed that with the increase of soil moisture from 10% to 25%, the temperature of the outlet air decreases from 25.5°C to 23.5°C. The average efficiency at soil moistures of 25% and 10%, was 0.82 and 0.69 respectively. The produced cooling power was 2.7 kW and 2.2 kW, at two levels of soil moisture respectively. The best treatment from the point of performance indicators was obtained with a tube length of 34 meters and soil moisture of 25%. The outlet air temperature, system efficiency, cooling power and coefficient of performance for this treatment were 23.7°C, 0.90, 2.8 kW and 3.7 respectively.

Keywords: Cooling, Geothermal Energy, Greenhouse, Renewable Energy



© 2023 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)