



Semnan University



Research Article

Effect of the Distance Between the Pipes on the Thermal Performance of Multi-Pipe Earth-To-Air Heat Exchangers with Parallel Pipes

Amin Hadidi ^{a,*}, Seyed Hamed Mousavi ^b, Asgar Minaei ^c

^a Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b M.Sc., Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Ahar branch, Ahar, Iran

^c Assistant Professor, Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 07 April 2023

Revised: 11 June 2023

Accepted: 17 June 2023

Keywords:

earth-to-air heat exchanger,
thermal saturation,
parallel arrangement,
numerical simulation,
Tehran climate.

ABSTRACT

In this research, the thermal performance of the earth -to-air exchanger with three parallel pipes is simulated in 3D. The thermal saturation of the soil in the considered exchanger with a length of 30 m and a burial depth of 3 m in Tehran city has been investigated. The aim of the research is to investigate the effect of the distance between the pipes on the thermal saturation of the around soil, consequently, its effect on the exit temperature and the overall heat transfer rate. The results showed that in the first days of operation, the temperature of the air exiting from the middle and side pipes does not change much; But with the passage of time, the temperature of the air in the middle pipe decreases to a smaller amount than the side pipes. The distance between the pipes has a significant effect on the outlet temperature of the middle and side pipes, especially after a few days of system operation. By increasing the distance between the pipes from 25 to 50, 75 and 100 cm, the heat transfer amount from the middle pipe at a flow rate of 0.1 kg/s increases by 14.5%, 26.5 and 35.6%, respectively.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.30326.2432>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: amin.hadidi@tabrizu.ac.ir

How to cite this article:

Hadidi, A., Mousavi, H., & Minaei, A. (2023). Effect of the distance between the pipes on the thermal performance of multi-pipe earth-to-air heat exchangers with parallel pipes. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 147-159. doi: 10.22075/jme.2023.30326.2432

بررسی اثر فاصله بین لوله‌ها بر عملکرد حرارتی مبدل گرمائی زمین به هوا با لوله‌های موازی

امین حدیدی^{۱*}، سید حامد موسوی^۲، عسگر مینائی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۸	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷	
واژگان کلیدی:	
مبدل زمین به هوا،	در این پژوهش، عملکرد حرارتی مبدل زمین به هوا با سه لوله موازی بصورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. اشباع حرارتی خاک در مبدل مورد نظر با طول ۳۰ متر و عمق دفن ۳ متر در شهر تهران با در نظر گرفتن مقادیر واقعی دمای ساعتی محیط بیرون بررسی شده است. هدف پژوهش، بررسی تاثیر فاصله بین لوله‌ها بر اشباع حرارتی خاک پیرامون لوله‌ها و در نتیجه تاثیر آن بر دمای خروجی از لوله‌ها و نرخ انتقال حرارت کلی است. تاثیر فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها بر دمای خروجی و نرخ انتقال حرارت از هوا به خاک به ازای دبی 1 kg/s در طول دوره سرمایش بررسی شده است. نتایج نشان داد در روزهای اول کارکرد، دمای هوای خروجی از لوله وسط و کناری تغییر چندانی نمی‌کند؛ ولی با گذشت زمان مقدار دمای هوا در لوله وسط نسبت به لوله کناری به مقدار کمتری کاهش می‌یابد. فاصله مراکز لوله‌ها تاثیر بسزایی در دمای خروجی از لوله وسط و کناری بخصوص بعد از گذشت چند روز از عملکرد سیستم دارد. با افزایش فاصله بین لوله‌ها از ۲۵ به ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر، مقدار انتقال حرارت از لوله وسط در دبی 1 kg/s به ترتیب ۱۴/۵٪، ۲۶/۵ و ۳۵/۶٪ افزایش می‌یابد.
	DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2023.30326.2432
	© 2023 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

است. این مبدل‌ها در شکل‌بندی‌های متفاوتی وجود دارند که متداول‌ترین آن‌ها، لوله‌های افقی دفن شده در عمق زمین است. در این مبدل‌ها در فصل تابستان، هوای گرم بیرون وارد لوله مبدل شده و در طول لوله مبدل، خنک شده و برای سرمایش یا پیش‌سرمایش ساختمان استفاده می‌شود. در ساختمان‌های شهری به دلیل محدودیت سطح، استفاده از یک لوله افقی برای مبدل زمین به هوا، ممکن است امکان‌پذیر نباشد. به همین دلیل می‌توان از چندین لوله موازی در آرایش‌های مختلف استفاده کرد. در مبدل زمین به هوا در فصول گرم، با گذشت زمان به دلیل انتقال حرارت از هوا به خاک، دمای خاک اطراف لوله افزایش می‌یابد که به آن اشباع حرارتی خاک می‌گویند. این امر

دمای زمین به طور معمول در فصل زمستان بالاتر از هوای محیط بیرون و در فصل تابستان کمتر از هوای محیط بیرون است. به همین دلیل زمین می‌تواند برای گرمایش ساختمان در زمستان و سرمایش ساختمان در فصل تابستان استفاده شود [۱ و ۲] که این اساس کار مبدل‌های زمین به هواست. در این مبدل‌ها، لوله‌های حاوی آب یا محلول گلیکول در عمق زمین کار گذاشته می‌شوند. سیال عبوری از لوله، خنک شده و به سمت اواپراتور (در حالت گرمایش) یا کندانسور (در حالت سرمایش) می‌روند و بعد از تبادل حرارتی در پمپ حرارتی، دوباره به سمت لوله‌ها بر می‌گردند [۳]. اخیراً به جای آب از نانوسیالات مختلف [۴-۶] نیز استفاده شده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amin.hadidi@tabrizu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. کارشناسی‌ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر ایران

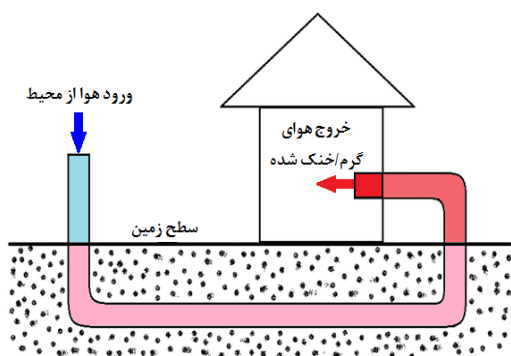
۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

استناد به این مقاله:

انشعاب ورودی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد زمانی که فاصله بین لوله‌ها ۱/۲ متر و عمق دفن لوله‌ها ۳ متر بود، بیشترین نرخ تبادل گرما بدست آمد و بهترین توزیع هوا در لوله‌ها از لحاظ یکنواختی در این حالت بود. هنگامی که زاویه لوله انشعاب ورودی به جریان هوا ۷۵ درجه بود، از لحاظ یکنواختی توزیع هوا، بهترین حالت بود. لازم به ذکر است که در پژوهش مذکور، بهینه‌سازی ریاضی [۱۱] در ساختار مبدل انجام شده است. برای بهینه‌سازی کامل هندسی با در نظر گرفتن همه پارامترهای طراحی دخیل، لازم است از الگوریتم‌های بهینه‌سازی [۱۲ و ۱۳] نظیر بهینه‌سازی مرسوم در سیستم‌های ترمودینامیکی با الگوریتم‌های تکاملی [۱۴-۱۷]، استفاده گردد. با توجه به اهمیت مبدل‌های گرمایی زمینه به هوا و نیز لزوم بررسی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر عملکرد آن در اقلیم‌های مختلف، در پژوهش حاضر نیز اثر فاصله بین لوله‌ها بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی زمین به هوای سه لوله‌ای با لوله‌های موازی در شرایط اقلیمی تهران مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تعریف مسئله

شکل شماتیک مبدل گرمایی زمین به هوا در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک مبدل زمین به هوا

در این نوع مبدل، هوای محیط بیرون وارد مبدل شده و سپس خنک (در فصول گرم) یا گرم (در فصول سرد) شده و به داخل منزل هدایت شده یا می‌تواند برای پیش‌گرم کردن هوای داخل ساختمان استفاده شود. این نوع مبدل‌ها از دو قسمت عمودی و یک قسمت افقی تشکیل شده است. طول قسمت عمودی در مقایسه با طول قسمت افقی کوچک است و همچنین به علت نزدیکی به سطح زمین، این قسمت‌ها معمولاً باعث اتلاف حرارت می‌شوند. به همین دلیل در شبیه‌سازی‌ها، این قسمت‌ها در نظر گرفته نمی‌شود

رفته‌رفته نرخ انتقال حرارت بین هوا و خاک را کاهش داده و باعث کاهش بازدهی سیستم مبدل زمین به هوا با گذشت زمان می‌شود. در خاکی که در بین دو لوله قرار دارد چون انتقال حرارت از طرف دو لوله به آن خاک صورت می‌گیرد، افزایش دمای آن بیشتر بوده و در نتیجه اشباع حرارتی نیز بیشتر است. با توجه به اهمیت موضوع، پژوهشگران مختلفی عملکرد این نوع مبدل‌ها را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند که در این بخش اهم آن‌ها مرور شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

لی و استرنند [۷] اثر شعاع، طول و عمق لوله و سرعت جریان هوا را بر عملکرد کلی مبدل زمین به هوا تحت شرایط مختلف در حالت سرمای‌ش مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که طول و عمق لوله بر ظرفیت سرمای‌ش مبدل تأثیر می‌گذارد، در حالی که شعاع لوله و سرعت جریان هوا عمدتاً بر دمای خروجی مبدل تأثیر می‌گذارد. روسا و همکاران [۸] در مطالعه عددی سه بعدی گذرای خود، به ارزیابی تأثیر سه پارامتر فاصله بین لوله‌ها، قطر لوله‌ها و سرعت جریان هوا در لوله‌های یک مبدل حرارتی زمین به هوای چند لوله‌ای برای ساختمان‌های مسکونی در اقلیم مدیترانه‌ای پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که برای یک قطر لوله مشخص و فاصله بین لوله‌های مجاور مشخص، هر چه سرعت هوا بیشتر باشد، عملکرد حرارتی سیستم برای خنک کردن، کمتر خواهد بود. نتایج همچنین نشان داد که برای سرعت معین هوا و نیز به ازای قطر لوله مشخص، فاصله بین لوله‌ها را می‌توان از یک متر به ۰/۵ متر کاهش داد، بدون اینکه عملکرد مبدل حرارتی زمین به هوا به خطر بیفتد. رامیرز و همکاران [۹] پژوهشی عددی برای پیش‌بینی رفتار حرارتی مبدل حرارتی زمین به هوا برای سه شهر با اقلیم مختلف در مکزیک انجام دادند. سه شهر "جوآرز" با گرمای بسیار زیاد در تابستان و دمای پایین در زمستان، "مکزیکو سیتی" با آب و هوای معتدل و "مریدا" با آب هوای گرم انتخاب شدند. برای شهرهای جوآرز و مکزیکو سیتی مبدل زمین به هوا در فصل تابستان عملکرد بهتری نشان داد ولی برای شهر گرم مدیرا، مبدل زمین به هوا در فصل زمستان عملکرد خوبی نشان داد. چی و همکاران [۱۰] بصورت عددی به بهینه‌سازی ساختار مبدل زمین به هوای چند لوله‌ای پرداختند. ایشان تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی زمین به هوا، از جمله فاصله بین لوله‌ها، عمق لوله‌ها و زاویه لوله

شبه‌سازی در نظر گرفته شده است. میدان حل مطابق شکل (۲) به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شده است. دیوارهای عمودی این مکعب در فاصله‌ای از لوله‌ها قرار گرفته‌اند که از دمای لوله‌ها تاثیر نپذیرند. برای بررسی تداخل حرارتی این مبدل‌ها بر یکدیگر چهار فاصله متفاوت مرکز تا مرکز لوله‌ها (XCC) در نظر گرفته شده است.

۳- معادلات حاکم

فرضیات در نظر گرفته شده برای انجام شبه‌سازی عددی، عبارت‌اند از:

۱. خواص حرارتی خاک، هوا و لوله به صورت ثابت و همگن در نظر گرفته شده است؛
۲. از مقاومت تماسی بین لوله-هوا و لوله-زمین صرف‌نظر شده است؛
۳. انتقال حرارت در زمین و لوله به صورت انتقال حرارت رسانشی در نظر گرفته شده است؛
۴. سیال، نیوتنی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. معادله حاکم بر قسمت‌های جامد (سطوح لوله‌ها)، معادله انرژی می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\partial(\rho_s C_{p,s} T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

در معادله فوق، ρ ، $C_{p,s}$ و k_s به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت گرمایی دیواره لوله می‌باشد. همچنین T دما بوده و x_i بیانگر مختصات مکانی می‌باشند (۳ و ۲ و ۱). معادلات حاکم بر جریان سیال در داخل لوله‌ها نیز در ادامه تشریح شده است. معادله پیوستگی [۱۸]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

در معادله فوق، ρ چگالی سیال بوده و u_i نیز مولفه‌های بردار سرعت سیال می‌باشند. به علت بالا بودن عدد رینولدز در لوله‌های مبدل زمین به هوا، جریان سیال در داخل لوله‌ها به صورت آشفتگی می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان آشفتگی از مدل توربولانسی k-ε استاندارد استفاده شده است.

معادله مومنوم [۱۸]:

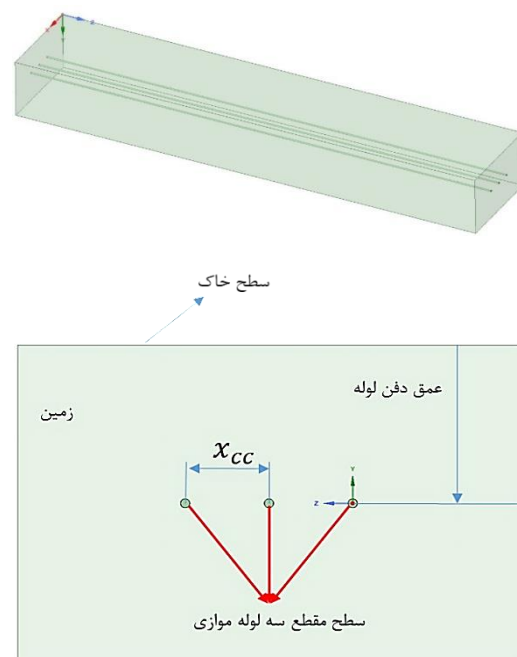
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \right. \quad (3)$$

$$\left. \times \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] + \rho g_i$$

و فقط قسمت افقی در نظر گرفته می‌شود. در بعضی از کاربردها، به جهت کمبود فضای زمین، بجای یک لوله از چندین لوله به صورت موازی استفاده می‌شود. در صورتی که از چندین لوله به صورت موازی در زیر زمین به عنوان مبدل حرارتی استفاده شود، ممکن است این لوله‌ها بر روی یکدیگر تداخل حرارتی داشته باشند که این امر عملکرد این نوع مبدل‌ها را تنزل می‌دهد. در این مقاله هدف، بررسی تاثیر فاصله لوله‌ها بر عملکرد مبدل زمین به هوا با چند لوله موازی است. در این راستا یک مبدل زمین به هوا با سه لوله موازی کارگذاشته شده در عمق زمین، در نظر گرفته شده است. چهار فاصله مختلف مرکز تا مرکز لوله‌ها در نظر گرفته شده و عملکرد این نوع مبدل‌ها در شرایط واقعی تداخل حرارتی و تاثیر آن بر دمای خروجی بررسی شده است.

۲-۱- هندسه حل

مبدل حرارتی در نظر گرفته شده، شامل سه لوله موازی است که در یک عمق از خاک به صورت موازی دفن شده‌اند. شماتیکی از قسمت‌های افقی لوله‌های موازی مبدل در میدان حل به ترتیب بصورت نمای سه بعدی و نیز نمای جانبی آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- هندسه حل

برای شبه‌سازی عددی این مبدل، سه لوله با قطر داخلی 110 mm، ضخامت جداره 5/2 mm و طول 30 m در نظر گرفته شده‌اند. لوله‌ها در عمق ۲ متری از سطح زمین دفن شده‌اند. خاک اطراف لوله‌ها تا فاصله چند متر نیز در

ایام سال با توجه به دمای محیط بیرون نیاز چندانی به سرمایش احساس نمی‌شود. بدین منظور دمای محیط در بازه یک ساعته از یک اردیبهشت تا ۳۱ شهریور به عنوان دمای ورودی به مبدل در نرم افزار داده شده است. با توجه به اینکه تغییرات دمای خاک بر حسب عمق بر عملکرد مبدل حرارتی تاثیر می‌گذارد، به همین دلیل این پارامتر بصورت شرط مرزی در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. توزیع دمای خاک بصورت تابعی از عمق آن به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۰]:

$$T(y,t) = T_m - A_{surf} \exp\left(-y \sqrt{\frac{\pi}{P\alpha_s}}\right) \times \cos\left[\frac{2\pi}{P}\left(t - t_0 - \frac{y}{2} \sqrt{\frac{P}{\pi\alpha_s}}\right)\right] \quad (9)$$

در معادله (۹) α_s ضریب نفوذ حرارتی خاک و Z بیانگر فاصله از سطح زمین است. همچنین T_m بیانگر دمای متوسط سالیانه سطح خاک، A_{surf} دامنه تغییرات دمای سطح خاک در طول یک سال و t_0 بیانگر فاصله زمانی ابتدای سال می‌باشد. همچنین P بیانگر دوره تناوب است که در معادله فوق برابر با دوره زمانی یک ساله است. مقادیر T_m ، A_{surf} و t_0 از اطلاعات آب و هوایی بدست می‌آید [۲۱]. این مقادیر برای شهر تهران در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای دمای زمین برای اقلیم تهران [۲۱]

مقدار	پارامتر
۱۷/۳	T_m (°C)
۱۳/۷	A_{surf} (°C)
۲۰	t_0 (روز)

لازم به ذکر است که در معادله (۹) زمان $t_0 = t_{\text{مبیین ابتدای سال میلادی}}$ است، در حالیکه شروع شبیه‌سازی از یک اردیبهشت در نظر گرفت شده است. بدین منظور رابطه (۹) به صورت معادله (۱۰) باز نویسی شده و پارامتر t_s به آن اضافه شده است که بیانگر اختلاف زمان لحظه شروع سال میلادی و لحظه شروع شبیه‌سازی می‌باشد.

$$T(y,t) = T_m - A_{surf} \exp\left(-y \sqrt{\frac{\pi}{\tau\alpha_s}}\right) \times \cos\left[\frac{2\pi}{\tau}(t - t_0 + t_s)\right] \quad (10)$$

دمای سطح خاک با استفاده از معادله (۱۰) و با قرار دادن $Z=0$ بدست می‌آید. دمای دیواره‌های عمودی میدان حل نیز

در معادله فوق، P ، μ و μt به ترتیب بیانگر فشار، لزجت دینامیک و لزجت توربولانسی سیال می‌باشند. معادله انرژی [۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + S_h \quad (4)$$

در معادله (۴)، Pr و Pr_t به ترتیب بیانگر عدد پرانتل و عدد پرنتل توربولانسی جریان سیال داخل لوله‌ها می‌باشد. همچنین S_h بیانگر تولید گرما در داخل سیال است. معادلات $k-\epsilon$ توربولانس [۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

در معادلات (۵) و (۶) G_k نرخ تولید نامیده می‌شود. مقدار لزجت توربولانسی و نرخ تولید از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

در معادلات (۴) تا (۷)، پارامترهای $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ ، C_μ ، $k\sigma$ و σ_ϵ ضرایب ثابت برای مدل توربولانسی $k-\epsilon$ استاندارد می‌باشند که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر ضرایب ثابت معادلات توربولانسی [۱۸]

مقدار	پارامتر
۱/۴۴	$C_{1\epsilon}$
۱/۹۲	$C_{2\epsilon}$
۰/۰۹	C_μ
۱/۰	$k\sigma$
۱/۳	σ_ϵ

۳-۱- شرایط مرزی

دمای ورودی مبدل زمین به هوا از داده‌های آب و هوایی شهر تهران که برای استفاده در نرم افزار EnergyPlus ساخته شده [۱۹] استخراج شده است. دوره سرمایش از ۱ اردیبهشت تا ۳۱ شهریور در نظر گرفته شده است. در بقیه

$(\text{kg/m}^3) 1/225$	چگالی هوا
$(\text{J/kg.K}) 1006$	گرمای ویژه هوا
$(\text{W/m.K}) 0/242$	ضریب هدایت حرارتی هوا
$(\text{kg/m}^3) 1/7894 \times 10^{-5}$	لزجت هوا

۴-۱- استقلال حل از شبکه محاسباتی

برای نشان دادن استقلال حل از شبکه محاسباتی، دمای خروجی از لوله وسط برای شبکه محاسباتی با ۴ نوع مش مختلف و برای دوازده زمانی شامل ۵۰ ساعت و ۱۰۰ ساعت پس از شبیه‌سازی، در جدول ۴ ارائه شده است.

تعداد مش	۵۰ ساعت پس از شبیه‌سازی	۱۰۰ ساعت پس از شبیه‌سازی
۳۹۵۴۵۱	۲۹۲/۷۵	۲۹۰/۸۸
۴۹۳۷۱۳	۲۹۲/۶۴	۲۹۱/۰۸
۷۹۸۲۰۷	۲۹۲/۵۸	۲۹۱/۰۳
۱۱۶۹۵۶۲	۲۹۲/۵۷	۲۹۱/۰۳

دمای خروجی از لوله وسط برای مش ۷۹۸۲۰۷ و ۱۱۶۹۵۶۲ تفاوت ناچیزی دارد. لذا شبکه با تعداد مش ۷۹۸۲۰۷ انتخاب شده است. مش‌های استفاده شده در شبیه‌سازی از نوع شش وجهی و چهار وجهی می‌باشد.

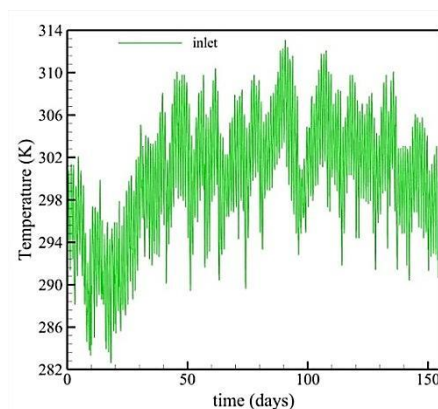
۴-۲- صحه‌گذاری نتایج

برای صحه‌گذاری نتایج پژوهش از داده‌های تجربی "واز" و همکاران [۲۲] استفاده شده است. واز و همکاران در مطالعه تجربی خود به بررسی انتقال حرارت در مبدل زمین به هوایی با سه لوله موازی با آرایش مثلثی که بصورت A, B و C نام گذاری کردند، پرداختند. لوله‌های A و B در عمق ۱/۶ متری از سطح زمین و با فاصله ۰/۶ متر از همدیگر قرار داشتند. لوله C نیز در عمق ۰/۵ متری از سطح زمین قرار گرفته بود. قطر خارجی لوله‌های A و B برابر با ۱۱۰ میلی‌متر و قطر لوله C برابر با ۱۰۰ میلی‌متر بود. سرعت هوا در سه لوله مزبور به ترتیب برابر ۳/۳، ۳/۶ و ۲/۵ متر بر ثانیه بود. طول لوله‌ها برابر با ۲۵/۷۷ متر بود. دمای خاک در اعماق پایین در طول سال ثابت و برابر با ۲۹۱/۸۵ کلوین بود. برای حذف اثرات اولیه، آزمایش‌ها برای بازه زمانی دو سال پیاپی انجام گرفته و نتایج سال دوم گزارش شده‌اند.

با استفاده از معادله (۱۰) تعیین می‌شود. شرط مرزی در سطح پایینی مکعب به صورت دما ثابت در نظر گرفته شده که مقدار آن برابر T_m است. دبی جرمی هوا در ورود به لوله‌های مبدل برابر $0/1 \text{ kg/s}$ در نظر گرفته شده است. جنس لوله‌ها از نوع پلی اتیلن چگال در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج

هدف پژوهش حاضر بررسی تداخل حرارتی سه لوله مبدل زمین به هوا و نیز فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها بر این تداخل حرارتی است. به این منظور، سرمایه‌ش توسط این نوع مبدل در شرایط اقلیمی تهران در نظر گرفته شده است؛ در این راستا، بازه زمانی اول اردیبهشت تا ۳۱ شهریور در نظر گرفته شده است. دمای هوای ورودی به مبدل، دمای محیط بیرون است که تغییرات آن در بازه زمانی مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات دمای محیط بیرون در شهر تهران از یک اردیبهشت تا ۳۱ شهریور (۱۵۶ روز) [۱۹]

خواص ترموفیزیکی و هندسی برای مدل‌سازی مبدل زمین به هوای مورد نظر، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- خواص ترموفیزیکی و هندسی برای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
طول لوله	۳۰ (m)
قطر داخلی لوله	۱۱۰ (mm)
ضخامت لوله	۲/۵ (mm)
چگالی خاک	۲۰۵۰ (kg/m^3)
گرمای ویژه خاک	۱۸۴۰ (J/kg.K)
ضریب هدایت حرارتی خاک	۰/۵۲ (W/m.K)
چگالی لوله	۱۳۸۰ (kg/m^3)
گرمای ویژه خاک	۹۰۰ (J/kg.K)
ضریب هدایت حرارتی لوله	۰/۱۶ (W/m.K)

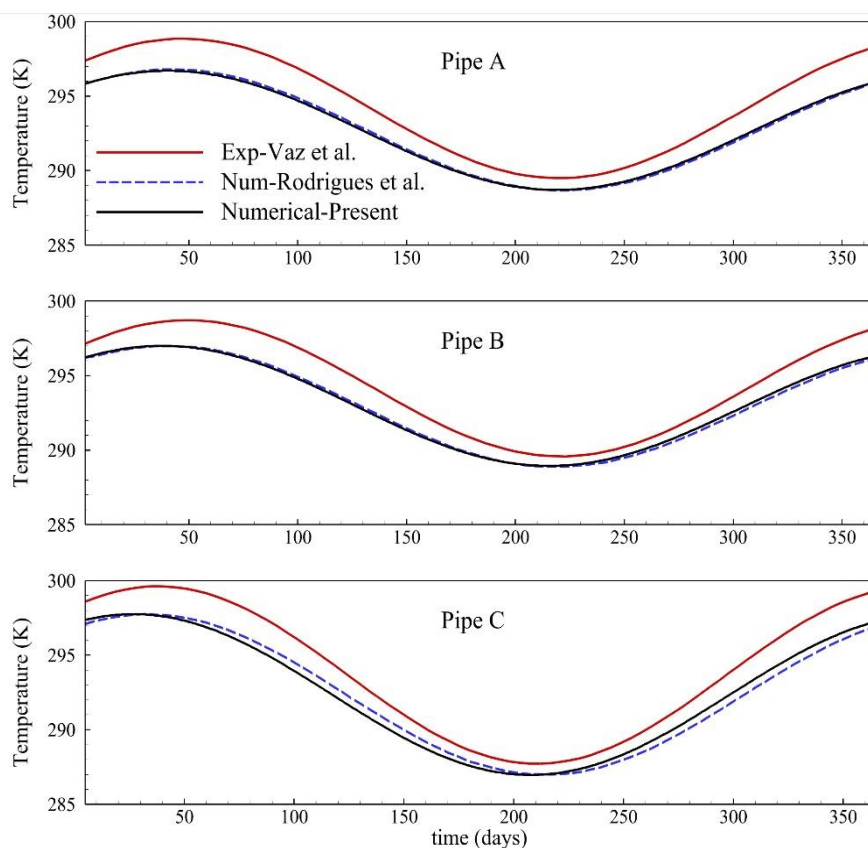
شده واز و همکاران [۲۲] و نیز نتایج عددی رودریگز و همکاران [۲۳] مقایسه شده است با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌شود که نتایج حل حاضر تطابق بسیار خوبی با نتایج عددی رودریگز و همکاران [۲۳] دارد. همچنین حل حاضر، از تطابق مناسبی با نتایج تجربی واز و همکاران برخوردار است. اختلاف متوسط در طول یکسال برای دمای خروجی از لوله‌های A, B و C با نتایج تجربی به ترتیب ۱/۶، ۱/۳ و ۱/۵ کلوین است. در همه نتایج، دمای خروجی حل عددی حاضر کم‌تر از نتایج تجربی است. مشاهده می‌شود حتی حل عددی رودریگز و همکاران [۲۳] که توسط همان گروه محققین پژوهش تجربی واز و همکاران انجام شده است، در تمامی نقاط کم‌تر از نتایج تجربی است. به همین دلیل، اختلاف حل عددی حاضر و حل عددی رودریگز و همکاران [۲۳] با نتایج تجربی را می‌توان ناشی از اختلاف در مقادیر ورودی‌های گزارش شده از قبیل خواص خاک، دمای ورودی و دمای سطح خاک توسط محققان مطالعه تجربی با مقادیر واقعی دانست.

آزمایش‌ها در شهر "ویامو" که در جنوب برزیل قرار دارد، انجام گرفته است. رودریگز و همکاران [۲۳] نیز یک حل عددی برای شرایط تجربی مشابه پژوهش واز و همکاران با نظر گرفتن قسمت‌های افقی مبدل زمین به هوا توسعه داده‌اند. این محققین نیز مدل خود را با نتایج تجربی و عددی واز و همکاران [۲۲] اعتبارسنجی کرده‌اند. خواص حرارتی خاک، لوله و هوا در مطالعه تجربی واز و همکاران [۲۲] در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مشخصات ترموفیزیکی مواد برای اعتبارسنجی [۲۲]

ماده	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
هوا	۱/۲۲۵	۱۰۰۶	۰/۰۲۴۲
خاک	۱۸۰۰	۱۷۸۰	۲/۱
لوله	۱۳۸۰	۹۰۰	۰/۱۹

در شکل (۴)، نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی برازش

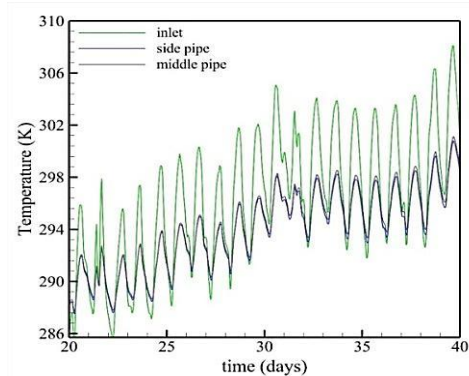


شکل ۴- مقایسه حل دمای خروجی از سه لوله موازی A, B و C برای حل عددی حاضر با داده‌های تجربی واز و همکاران [۲۲] و نتایج عددی رودریگز و همکاران [۲۳]

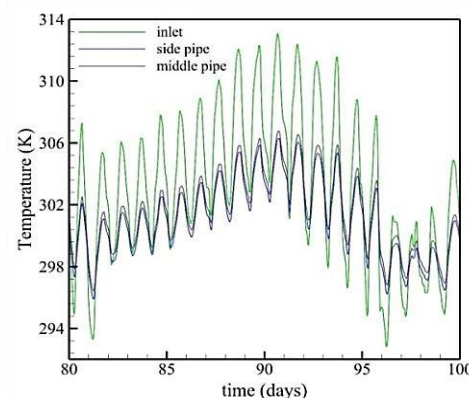
خاک اطراف لوله وسط نسبت به خاک اطراف لوله کناری به مقداری بیشتری افزایش یافته و در نتیجه، انتقال حرارت از هوای لوله وسط به خاک نسبت به انتقال حرارت از هوای لوله کناری کمتر بوده و به تبع آن دمای خروجی لوله وسط از لوله کناری کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر با گذشت زمان، خاکی که وسط لوله‌ها قرار دارد چون از هوای داخل دو لوله گرما دریافت می‌کند، نسبت به خاکی که در کنار فقط یک لوله قرار دارد، گرمای بیشتری دریافت می‌کند؛ از این رو افزایش دمای خاک وسط بیشتر بوده و به همین دلیل نرخ انتقال حرارت از لوله وسط به خاک در مقایسه با لوله کناری، کمتر بوده و در نتیجه دمای هوای خروجی از لوله وسط کمتر خواهد بود. برای درک بهتر این موضوع، کانتور دمای هوای داخل لوله‌ها و خاک اطراف در صفحه عمود بر لوله‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. مکان صفحه، دقیقاً وسط لوله‌ها یعنی به فاصله ۱۵ متر از ورودی انتخاب شده است. کانتور دما در چهار دوره زمانی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عملکرد سیستم، دمای داخل لوله تا فاصله بیشتری از خاک نفوذ می‌کند. نفوذ حرارت باعث می‌شود که اختلاف دمای سیال داخل لوله و خاک اطراف لوله کاهش یافته و در نتیجه انتقال حرارت از هوای داخل لوله به خاک اطراف کاهش یابد. همین امر سبب می‌شود که دمای خروجی از لوله افزایش یابد. این افزایش دمای خاک در نواحی که بین دو لوله قرار دارند، بیشتر است؛ زیرا انتقال حرارت از هوای بین دو لوله به این نواحی انتقال یافته و باعث افزایش بیشتر دمای خاک در آنجا می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در حالتی که ۲۵ روز از ابتدای شبیه‌سازی می‌گذرد، خاک وسط بین دو لوله تأثیری چندانی از دو لوله نگرفته و دمای آن با دمای خاک دور دست از لوله‌ها تقریباً برابر بوده و لوله‌های کناری و وسط، رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند. ولی با ملاحظه کانتورهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ روز مشاهده می‌شود که با گذشت زمان، دمای خاک وسط لوله‌ها تفاوت معناداری با خاک دور دست از لوله پیدا می‌کند. در نتیجه با گذشت زمان، دمای خاک اطراف لوله‌ها افزایش یافته و باعث افزایش دمای هوای خروجی از آن‌ها می‌شود که این افزایش در خاک اطراف لوله وسط بیشتر است.

۳-۴- تغییرات دمای خروجی از لوله وسط و کناری

با توجه به اینکه دمای دو لوله کناری با همدیگر برابر است، فقط یکی از این دو لوله (اولی یا سومی) در بررسی‌ها مدنظر خواهد بود. دو بازه زمانی ۲۰-۴۰ روز (شکل ۵-الف) و بازه زمانی ۸۰-۱۰۰ روز شبیه‌سازی (شکل ۵-ب) در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که دمای خروجی از میدل در دو لوله وسط و کناری در بازه زمانی ۲۰ تا ۴۰ روز تفاوت چندانی ندارد و بخصوص در بازه زمانی ۲۰-۳۰ روز تقریباً با هم برابرند؛ ولی دمای خروجی از دو لوله وسط و کناری در بازه زمانی ۸۰ تا ۱۰۰ روز تفاوت محسوسی دارد. این امر نشان می‌دهد که در روزهای اول شبیه‌سازی چون دمای خاک اطراف لوله وسط نسبت به خاک اطراف لوله کناری به مقدار زیادی افزایش نیافته است، به همین دلیل دمای هوای خروجی از دو لوله تقریباً یکسان است.

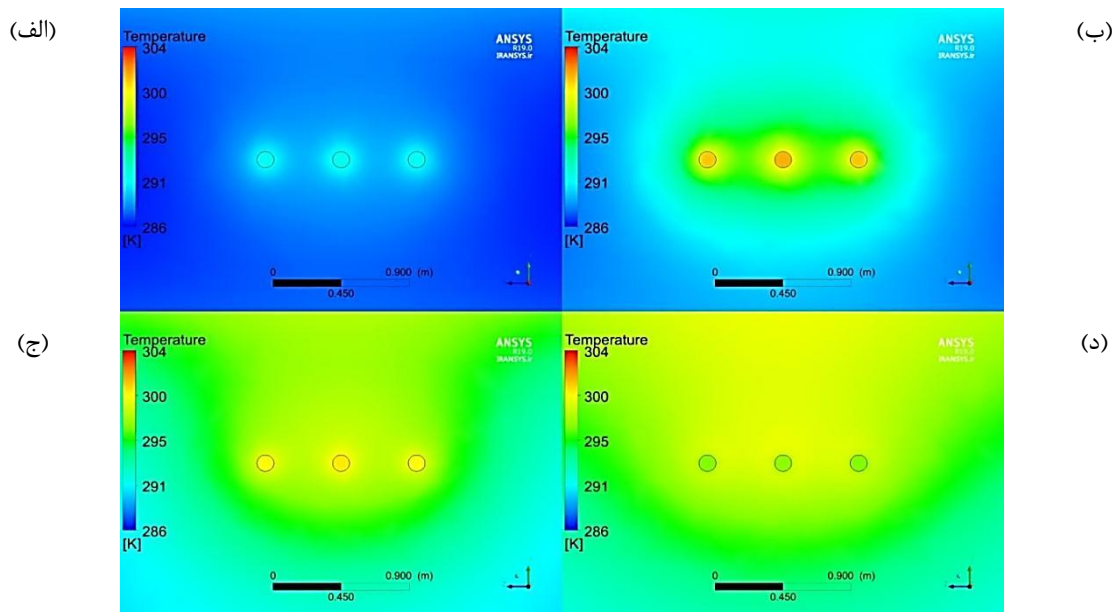


(الف)

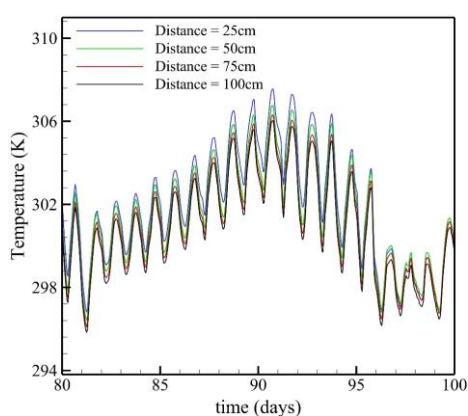


(ب)

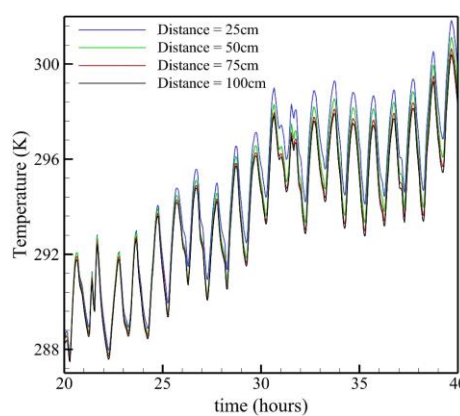
شکل ۵- تغییرات دمای خروجی از لوله‌های وسط و کناری در دوبازه زمانی مختلف؛ الف) بازه زمانی ۲۰-۴۰ روز، ب) بازه زمانی ۸۰-۱۰۰ روز



شکل ۶- کانتور دما در ۱۵ متر از ابتدای لوله برای چهار زمان مختلف؛ (الف) ۲۵ روز بعد از شبیه‌سازی، (ب) ۵۰ روز بعد از شبیه‌سازی، (ج) ۱۰۰ روز بعد از شبیه‌سازی و (د) ۱۵۰ روز بعد از شبیه‌سازی

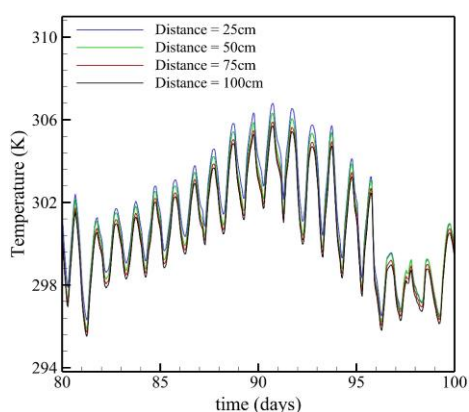


(ب)

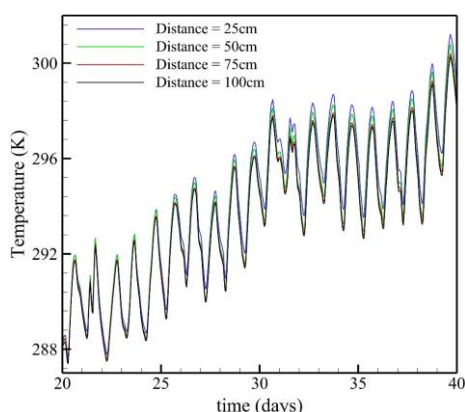


(الف)

شکل ۷- دمای خروجی از لوله وسطی در چهار فاصله متفاوت مراکز لوله‌ها؛ (الف) بازه ۲۰-۴۰ روز، (ب) بازه ۸۰-۱۰۰ روز



(ب)



(الف)

شکل ۸- دمای خروجی از لوله کناری در چهار فاصله متفاوت مراکز لوله‌ها؛ (الف) بازه ۲۰-۴۰ روز، (ب) بازه ۸۰-۱۰۰ روز

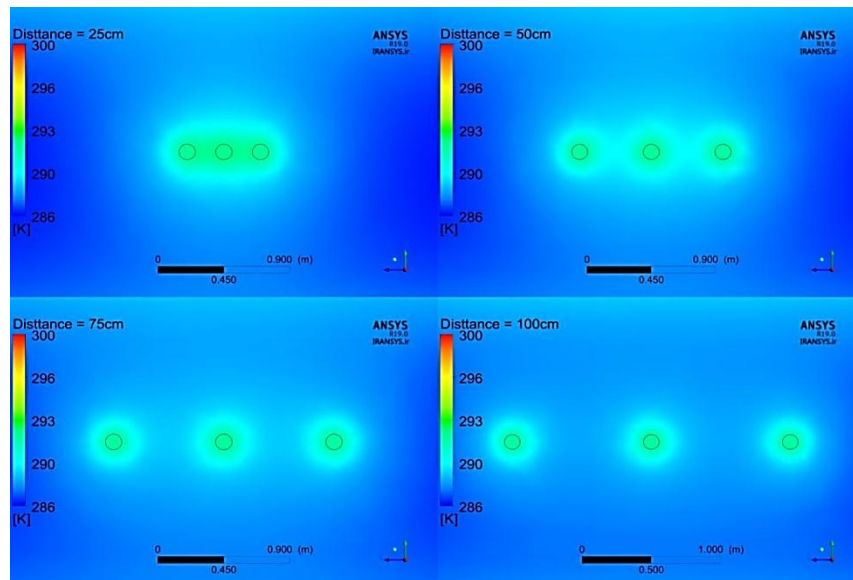
۴-۴ اثر فاصله مراکز لوله‌ها بر دمای خروجی

یکی از مهمترین پارامترها در مقدار دمای خروجی از لوله‌های مبدل زمین به هوا، فاصله مرکز به مرکز این لوله‌ها

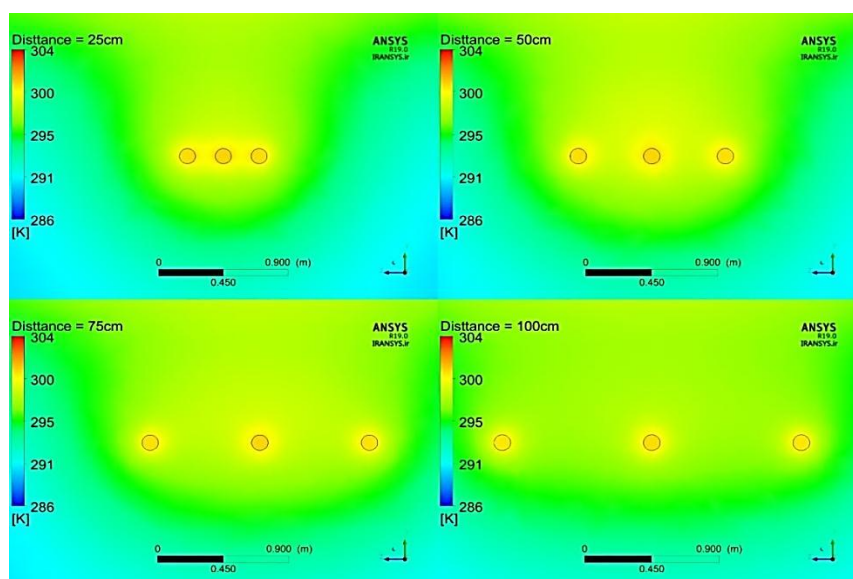
از یکدیگر است. به همین دلیل در این قسمت، تاثیر فاصله مراکز لوله‌ها در دمای خروجی از لوله وسط (شکل ۷) و کناری (شکل ۸) بررسی شده است.

تداخل حرارتی تا حد زیادی وابسته به فاصله مراکز لوله‌ها است. هر چقدر این فاصله بیشتر باشد، احتمال تداخل حرارتی و نفوذ حرارت به وسط دو لوله کاهش می‌یابد و همین امر سبب بهبود عملکرد مبدل زمین به هوا می‌شود. با ملاحظه شکل (۸) نیز مشاهده می‌شود که دمای خروجی از لوله کناری نیز در روزهای ۲۰ تا ۲۵ برای چهار فاصله متفاوت مراکز لوله‌ها تفاوت چندانی نمی‌کند؛ ولی با گذشت زمان، تداخل حرارتی خود را نشان داده و مقدار دمای خروجی از لوله کناری با افزایش فاصله بین لوله‌ها کاهش می‌یابد. کانتور دمایی در صفحه میانی عمود بر لوله‌ها برای فواصل بررسی شده مراکز لوله‌ها، در شکل (۹) نشان داده شده است.

تغییرات دمای هوای خروجی از لوله وسطی برای چهار فاصله مرکز تا مرکز لوله متفاوت از ۲۵ تا ۱۰۰ cm برای دو بازه زمانی ۲۰ تا ۴۰ روز و ۸۰ تا ۱۰۰ روز بررسی شده است. دبی جرمی هوای داخل لوله در هر کدام از لوله‌ها kg/s است. در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۷)، مشاهده می‌شود که در زمان‌های ۲۰ تا ۲۳ روز، دمای خروجی از لوله وسط در فواصل متفاوت مراکز لوله‌ها، یکسان است. در روز ۲۵ دمای خروجی از لوله وسط برای دو فاصله ۷۵ و ۱۰۰ cm یکسان است. ولی برای دو فاصله کمتر، دمای خروجی مقدار بالاتری دارد. دمای خروجی در بازه زمانی ۸۰ تا ۱۰۰ روز نشان می‌دهد که با افزایش فاصله مراکز لوله‌ها، دمای خروجی از لوله وسط کاهش می‌یابد؛ زیرا



(الف)



(ب)

شکل ۹- کانتور دما در صفحه میانی عمود بر مسیر لوله؛ (الف) در ۲۵ روز شبیه‌سازی، (ب) در ۱۰۰ روز شبیه‌سازی

گذشت زمان، دمای خاک اطراف لوله‌ها افزایش می‌یابد و خاک از لحاظ حرارتی اشباع می‌شود. با افزایش دمای خاک اطراف لوله‌ها، نرخ انتقال حرارت از هوای داخل لوله‌ها به خاک اطراف کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در تمامی فواصل بین لوله‌ها، مقدار تبادل حرارت بین لوله کناری و خاک نسبت به تبادل حرارت بین لوله وسطی و خاک مقدار بیشتری دارد.

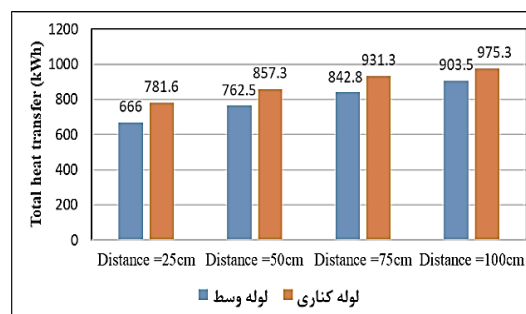
دلیل این امر همانطور که قبلاً ذکر شد، این است که دمای خاک میان لوله‌ها به دلیل دریافت حرارت از هوای داخل دو لوله نسبت به خاکی که فقط در نزدیکی یک لوله است، به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد. افزایش دمای خاک بین لوله‌ها باعث کاهش اختلاف دمای هوای داخل لوله و خاک اطراف آن می‌شود که این خود، سبب کاهش انتقال حرارت از هوای داخل لوله به خاک اطراف می‌شود. همچنین اختلاف مقدار انتقال حرارت از هوای داخل لوله وسط و لوله کنار به خاک اطراف در فواصل بین لوله‌های کم، بیشتر است. برای مثال در فاصله مرکز تا مرکز لوله برابر ۲۵ cm، مقدار انتقال حرارت از لوله کناری نسبت به لوله وسطی در حدود ۱۷٪ بیشتر است که این مقدار در فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ cm برابر با ۸٪ است. این امر بیانگر آن است که با افزایش فاصله بین لوله‌ها، مقدار انتقال حرارت در لوله‌های کناری و وسطی به هم نزدیک‌تر می‌شود که دلیل این امر نیز تداخل حرارتی است. همچنین مقایسه فاصله بین لوله‌ها نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از ۲۵ به ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ cm مقدار انتقال حرارت از لوله وسط به خاک به ترتیب ۱۴/۵٪، ۲۶/۱۵٪ و ۳۵/۶٪ افزایش می‌یابد. برای لوله کناری نیز به ازای همان افزایش فاصله بین لوله‌ها، مقدار انتقال حرارت به ترتیب ۹/۶٪، ۱۹/۲٪ و ۲۴/۸٪ افزایش می‌یابد.

۵- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر یک مبدل زمین به هوای افقی با چیدمان سه لوله موازی به صورت عددی شبیه‌سازی شد. عمق دفن ۳ متر، طول مبدل ۳۰ متر، قطر لوله‌ها ۱۱۰ میلی‌متر و جنس آنها PVC انتخاب شد. چهار فاصله مختلف بین مراکز لوله‌ها شامل ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر بررسی شد. دمای هوای ورودی به مبدل زمین به هوا، شرایط واقعی محیط بیرون در شهر تهران بوده که از داده‌های آب و هوایی، بدست آمده است. بنابراین، مدل‌سازی در شرایط واقعی صورت گرفته است. دوره سرمایش از یک اردیبهشت تا ۳۱ شهریور به مدت ۱۵۵ روز برای کارکرد مبدل در حالت

توجه به شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود که بعد از ۲۵ روز شبیه‌سازی، دمای خاک بین لوله‌ها در دو حالت فاصله مرکز تا مرکز ۲۵ و ۵۰ cm کاملاً متفاوت از دور دست لوله است. دمای این ناحیه به دلیل نزدیکی به دو لوله، حرارت بیشتری دریافت کرده و دمای آن افزایش یافته است. همین امر سبب می‌شود که دمای خروجی از لوله وسط در این دو فاصله نسبت به فاصله‌های مرکز تا مرکز ۷۵ و ۱۰۰ cm مقدار بیشتری داشته باشد. همچنین با توجه به شکل، دمای خاک در میان دو لوله در فاصله ۲۵ cm بیشتر از فاصله ۵۰ cm است که مطابق انتظار است. همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که دمای میان لوله‌ها در فاصله بین لوله‌های ۷۵ و ۱۰۰ cm تقریباً برابر با دمای خاک دور دست از لوله است که بیانگر این مطلب است که حرارت خاک بعد از ۲۵ روز تا این ناحیه نفوذ نکرده است. با ملاحظه شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عملکرد سیستم، دمای داخل لوله تا فاصله بیشتری از خاک نفوذ می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود حرارت در تمامی فواصل، تا مابین لوله‌ها نفوذ کرده و باعث افزایش دمای بیشتر این نقاط نسبت به نقاط دیگر شده است؛ هر چند که دمای خاک در بین دو لوله با افزایش فاصله بین دو لوله کاهش یافته است؛ این امر سبب کاهش دمای هوای خروجی از مبدل زمین به هوا می‌شود.

نمودار میله‌ای انتقال حرارت کلی بر حسب کیلووات-ساعت در طول دوره سرمایش از هوای داخل لوله میانی و کناری به خاک اطراف لوله، در چهار فاصله متفاوت مراکز لوله‌ها بررسی شده و نتایج در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- حرارت انتقال یافته از هوای درون لوله وسط و کناری به خاک در طول دوره سرمایش

با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین لوله‌ها، مقدار انتقال حرارت از هوای داخل لوله به خاک افزایش یافته است. دلیل این امر، با توجه به ثابت بودن دمای هوای ورودی به لوله در هر چهار حالت، این است که با

اطراف لوله کاهش یافته و در نتیجه دمای خروجی از لوله افزایش یابد؛ در فاصله بین لوله‌ای ۲۵ سانتی‌متر حتی در روزهای اول نیز دمای لوله تا فاصله وسط بین دو لوله نفوذ می‌کند؛

۴. با افزایش فاصله بین لوله‌ها در روزهای اول کارکرد، تفاوتی محسوسی بین دمای خروجی از لوله‌ها مشاهده نمی‌شود؛ ولی با افزایش زمان دمای هوای داخل لوله، به مقدار کمتری کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین لوله‌ها، مقدار انتقال حرارت از هوای داخل لوله به خاک افزایش یافته است. با افزایش فاصله بین لوله‌ها از ۲۵ به ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ cm، مقدار انتقال حرارت از لوله وسط به خاک در دبی ۰/۱ kg/s به ترتیب ۱۴/۵٪، ۲۶/۵٪، ۳۵/۶٪ افزایش می‌یابد. برای لوله کناری نیز با افزایش فاصله بین لوله‌ها از ۲۵ به ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ cm، مقدار انتقال حرارت به ترتیب ۹/۶٪، ۱۹/۲٪ و ۲۴/۸٪ افزایش می‌یابد.

سرمایش انتخاب شده و شبیه‌سازی شده است. عمده نتایج تحقیق عبارتند از:

۱. در طول دوره سرمایش، دمای لوله کناری در خروجی نسبت به لوله وسط به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد که مقدار درصد کاهش در فواصل بین لوله‌ای کوچک‌تر، بیشتر است. به طوری که انتقال حرارت کلی در طول کل دوره کارکرد سیستم برای لوله وسط نسبت به لوله کناری، برای فاصله بین لوله‌ای ۲۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر، به ترتیب ۱۷٪ و ۸٪ بیشتر است؛
۲. دمای خروجی از مبدل زمین به هوا در دو لوله وسط و کناری در بازه زمانی ۲۰ تا ۴۰ روز تفاوت چندانی ندارد و به خصوص در بازه زمانی ۲۰-۳۰ روز تقریباً با هم برابرند. ولی دمای خروجی از دو لوله وسط و کناری در بازه زمانی ۸۰ تا ۱۰۰ روز تفاوت محسوسی دارد؛
۳. با افزایش زمان عملکرد سیستم، دمای داخل لوله تا فاصله بیشتری از خاک نفوذ می‌کند. این نفوذ حرارت باعث می‌شود که اختلاف دمای سیال داخل لوله و خاک

مراجع

- [1] Reza Fathipour and Amin Hadidi. "Analytical solution for the study of time lag and decrement factor for building walls in climate of Iran". *Energy* 134 (2017): 167-180.
- [2] Amin Hadidi, Mehdi Maerefat and Amin Davari. "Analytical determination of time lag and decrement factors for walls in tehrans climate". *Sharif Journal of Mechanical Engineering* 30.3. no. 2.1 (2014): 39-46. (inPersian)
- [3] M. H. Esfe, S. Alidoust, S. Esfandeh, D. Toghraie, H. Hatami, M.H. Kamyab and E.M. Ardeshiri. "Theoretical -Experimental study of factors affecting the thermal conductivity of SWCNT-CuO (25:75)/water nanofluid and challenging comparison with CuO nanofluids/water". *Arabian Journal of Chemistry* 16 (2023): 104689.
- [4] M. H. Esfe, S. N. H. Tamrabad, H. Hatami, S. Alidoust and D. Toghraie. "Using the RSM to evaluate the rheological behavior of SiO₂ (60%) - MWCNT (40%)/SAE40 oil hybrid nanofluid and investigating the effect of different parameters on the viscosity". *Tribology International* 184 (2023): 108479.
- [5] M. H. Esfe, S. M. Motallebi, H. Hatami, M. K. Amiri, S. Esfandeh and D. Toghraie. "Optimization of density and coefficient of thermal expansion of MWCNT in thermal oil nanofluid and modeling using MLP and response surface methodology". *Tribology International* 183 (2023): 108410.
- [6] Amin Hadidi. "Effect of strength and direction of external magnetic field on dynamics of vortices in a square Lid-driven cavity flow". *Journal of Process Mechanical Engineering* 235. no. 5 (2021): 1315-1325.
- [7] K. H. Lee and R. K. Strand. "The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings". *Energy and Buildings* 40 (2008): 486-494.
- [8] N. Rosa, N. Soares, J. J. Costa, P. Santos, and H. Gervásio. "Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 38 (2020): 100649.
- [9] L. Ramírez-Dávila, J. Xamán, J. Arce, G. Álvarez, and I. Hernández-Pérez. "Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates". *Energy and Buildings* 76 (2014): 238-248.
- [10] D. Qi, S. Li, C. Zhao, W. Xie and A. Li. "Geothermics Structural optimization of multi-pipe earth to air heat exchanger in greenhouse". *Geothermics* 98 (2021): 1-12, 2022.
- [11] Amin. Hadidi. "Optimal sizing of louvered fin flat tube car radiator to achieve maximum cooling capacity". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 236.

Issue. 17 (2022): 9828-9844.

- [12] Amin Hadidi. "Optimization of electrically separated two-stage thermoelectric refrigeration systems using chemical reaction optimization algorithm". *Applied Thermal Engineering* 123 (2017): 514-526.
- [13] Amin Hadidi. "A novel approach for optimization of electrically serial two-stage thermoelectric refrigeration systems using chemical reaction optimization (CRO) algorithm". *Energy* 140 (2017): 170-184.
- [14] Amin Hadidi. "Biogeography-Based Optimization Algorithm for Optimization of Heat Exchangers", *Application of Metaheuristics in Process Engineering*, Springer International publishing Switzerland, 2014, 219-254.
- [15] Amin Hadidi, "A robust approach for optimal design of plate fin heat exchangers using biogeography based optimization (BBO) algorithm". *Applied Energy* 150 (2015): 196-210.
- [16] Amin Hadidi, Mojtaba Hadidi and Ali Nazari. "A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using imperialist competitive algorithm (ICA) from economic point of view". *Energy Conversion and Management* 67 (2013): 66-74.
- [17] Amin Hadidi and Ali Nazari. "Design and economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using biogeography-based (BBO) algorithm". *Applied Thermal Engineering* 51 (2013): pp. 1263-1272.
- [18] N. Benrachi, M. Ouzzane, A. Smaili, L. Lamarche, M. Badache and W. Maref. "Numerical parametric study of a new earth-air heat exchanger configuration designed for hot and arid climates". *International Journal of Green Energy* 17. no. 2 (2020): 115-126.
- [19] Weather Data by Region, Available: <https://energyplus.net/weather/sources>.
- [20] T. Kusuda and P. R. Achenbach. "Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States". National Bureau of Standards Gaithersburg MD., 1965.
- [21] A. Minaei, M. Bagheri, M. Maerefat and H. Ghaebi. "Thermal Performance Evaluation of Earth-to-Air Heat Exchanger Using a Semi-Transient Analytical Model". *Journal of Mechanical Engineering* 52. no. 1 (2022): 139-148.
- [22] J. Vaz, M. A. Sattler, D. Elizaldo, and L. A. Isoldi. "Experimental and numerical analysis of an earth – air heat exchanger". *Energy and Building* 43. no. 9 (2011): 2476–2482.
- [23] V. F. Hermes, J. V. A. Ramalho, L. A. O. Rocha, E. D. Dos Santos, W. C. Marques, J. Costi, M. K. Rodrigues and L. A. Isoldi. "Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city". *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 37 (2019): 100603. 00603.