

بررسی کارایی مبدل حرارتی مارپیچ اسپرال زمین-هوا در تامین بار حرارتی و برودتی ساختمان

نغمه جمشیدی^{۱*}، نسیمه صادقی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه معماری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

* صندوق پستی ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران، ایران، n.jamshidi@pnu.ac.ir

چکیده

استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تامین انرژی موردنیاز ساختمان‌ها با محدودیت‌های بسیاری از جمله کاهش منابع و اثرات مخرب زیست محیطی همراه است و استفاده از منابع رایگان و تجدید پذیر انرژی برای تامین بار حرارتی موردنیاز ساختمان‌ها مورد توجه می‌باشد. یکی از منابع انرژی رایگان، پاک و تجدیدپذیر انرژی موجود در لایه‌های زیر زمین است. اگرچه دمای خاک در لایه‌های سطحی ممکن است تحت تأثیر دمای محیط قرار گیرد، ولی دما در طول سال در اعماق زیرین سطح زمین تقریباً ثابت است؛ و در تابستان دمای زیر زمین کمتر و در زمستان بیشتر از دمای هوای محیط است. این پتانسیل می‌تواند برای سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق بناسبت به بررسی نوع مارپیچ اسپرال از مبدل حرارتی زمین-هوا پرداخته و عملکرد آن در شهر تهران ارزیابی گردد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار انسیس-فلوئنت به صورت سه بعدی در حالت پایدار انجام شده است. این سیستم در دو حالت گرمایشی و سرمایشی شبیه سازی شده و نتایج به صورت افزایش و یا کاهش دمای هوای ورودی بیان می‌گردند. تأثیر عواملی مانند عمق دفن شده مبدل حرارتی در خاک، سرعت و دمای هوای ورودی بر روی دمای هوای خروجی و میزان بار حرارتی مبادله شده مبدل حرارتی با زمین بررسی می‌گردد. در حالیکه افزایش عمق دفن مبدل باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد، افزایش سرعت ورودی سبب کاهش تبادل حرارت زمین و هوا می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد مبدل حرارتی اسپرال می‌تواند تا ۱۵ درجه دمای هوای ورودی به ساختمان را در زمستان افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: انرژی‌های تجدیدپذیر، مبدلهای حرارتی زمین گرمایی، بار حرارتی و برودتی، شبیه سازی عددی

Investigation of the Efficiency of the Earth-Air Spiral Heat Exchanger in Providing Part of the Heating and Cooling loads of a Building

Naghmeh Jamshidi^{1*}, Nasibeh Sadafi²

1- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

2- Department of Architecture, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

* P.O.B. 19395-3697 Tehran, Iran, n.jamshidi@pnu.ac.ir

Abstract

The use of fossil fuels to supply energy to the buildings is associated with many constraints, including the reduction of the resources and the environmental degradation, and the use of free and renewable sources of energy is noteworthy to provide the heat needed for the buildings. One of the free, clean and renewable energy sources is the energy in the underground layers of Earth. Although the soil temperature in the surface layers may be influenced by the temperature of the environment, the temperature during the year at sublayers is almost constant, and in the summer the temperature of the soil is lower and in winter it is higher than the ambient air temperature. This potential can be used for the cooling and heating of buildings. In this research, the spiral coiled tube air-earth heat exchanger has to be evaluated and its performance in Tehran should be evaluated. Three dimensional, steady state numerical simulations are performed using Ansys-Fluent software. The system is simulated in two heating and cooling modes, and the results are expressed as an increase or decrease in the temperature of the inlet air. The effect of factors such as the depth of the buried heat exchanger in the soil, the speed and temperature of the inlet air on the exhaust air temperature and the thermal load absorbed by the heat exchanger are investigated. While the burst depth of the heat exchanger increases the heat transfer, the increase in the air inlet velocity reduces the heat exchange between the soil and the air. Investigations show that the spiral heat exchanger can increase up to 15 °C of the air inlet temperature to the building during the winter.

Keywords: Renewable Energies, Geothermal Heat Exchangers, Heating and Cooling Loads, Numerical Simulation

۱- مقدمه

رشد جمعیت در جهان و افزایش سالانه مصرف از یک طرف، و افزایش هزینه‌ها و کاهش منابع انرژی‌های فسیلی از طرف دیگر، نیاز به استفاده از منابع رایگان، پاک و تجدیدپذیر را علاوه بر استفاده از سوخت‌های فسیلی لازم می‌سازد. در این میان انرژی زمین گرمایی یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر است که در آن از انرژی موجود در لایه‌های زیرزمین استفاده می‌گردد. برای استفاده از پتانسیل زمین جهت اهداف گرمایشی و سرمایشی می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. استفاده از آب‌های گرم در نوای جغرافیای خاص یکی از موارد کاربرد انرژی زمین گرمایی در مبحث گرمایش به جهت تامین بخشی از نیازهای روزانه افراد می‌باشد. مبدل‌های حرارتی به انواع مختلف مانند مبدل‌های حرارتی لوله‌ای، صفحه‌ای و ... می‌توانند در عمق زمین نصب شوند. مبدل‌های زمین گرمایی می‌توانند با توجه به نوع سیال به صورت مستقیم و یا غیرمستقیم در تامین بار حرارتی و برودتی ساختمان‌ها استفاده گردند. اگر سیال عامل در مبدل حرارتی زمین گرمایی هوا باشد، به آن مبدل حرارتی زمین-هوا گفته می‌شود. مبدل‌های حرارتی زمین-هوا از لوله‌هایی تشکیل شده که در عمق خاک نصب شده و در زمستان باعث پیش گرمایش و در تابستان سبب سرمایش هوای ورودی به ساختمان می‌شوند. مبدل‌های حرارتی زمین-هوا می‌توانند به دو صورت حلقه باز و حلقه بسته در سیکل تهویه مطبوع ساختمان استفاده شوند. در مبدل حرارتی زمین-هوا حلقه باز، هوای محیط از طریق لوله‌هایی به داخل عمق زمین رانده شده و پس از تبادل حرارت با خاک و افزایش دما در زمستان و کاهش دمای هوا در تابستان، به داخل ساختمان فرستاده می‌شود. هوای خروجی از مبدل پس از تهویه ساختمان از طریق نفوذ هوای در و پنجره‌ها به فضای محیط تخلیه می‌گردد. در سیستم حلقه بسته، هوای خروجی از مبدل به داخل ساختمان تخلیه شده و پس از تهویه مناسب از طریق کانال‌هایی مجدداً به داخل مبدل حرارتی زمین-هوا فرستاده می‌شود. لوله‌ها می‌توانند به صورت مستقیم عمودی، افقی و یا به صورت لوله‌های خمیده مارپیچ هلیکال و اسپیرال در داخل زمین نصب گردند. تغییرات دمای هوا می‌تواند به صورت سالانه و یا به صورت روزانه به صورت یک موج سینوسی باشد. تحقیقات بسیاری در زمینه تغییرات دما در لایه‌های مختلف از خاک در مناطق اقلیمی مختلف انجام شده است که همگی نشان دهنده تغییرات کم خاک در اعماق زمین تحت تاثیر تغییرات روزانه و سالانه هوا می‌باشد [۱-۴]. نفوذ کم تغییرات دما باعث می‌شود در زمستان دمای خاک گرمتر از دمای هوای بیرون و در تابستان دمای خاک خنک‌تر از دمای هوای محیط باشد. بنابراین می‌توان از این ظرفیت گرمایشی در زمستان جهت گرمایش ساختمان‌ها و در تابستان جهت سرمایش ساختمان‌ها استفاده نمود. دمای خاک در اعماق ۵ تا ۸ متری از سطح زمین تغییرات بسیار ناچیزی در کل سال دارد. با این وجود، میزان تغییرات دما در اعماق مختلف و نیز پروفیل تغییرات دما شدیداً به شرایط آب و هوایی منطقه و نوع خاک آن بستگی دارد.

ماتار و همکاران [۵] مبدل زمین-هوا لوله مستقیم و مارپیچ را در حالت-های سرمایش و گرمایش در کشور هند بررسی نمودند. ایشان بررسی خود را به دو صورت آزمایشگاهی و عددی انجام دادند. مبدل‌های حرارتی مستقیم و مارپیچ عملکرد حرارتی به ترتیب برابر با ۵/۹۴ و ۶/۲۴ در زمستان و ۱/۹۲ و ۲/۱۱ در تابستان دارند. شبیه‌سازی‌ها مطابق با اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده است و دما را مقاطع مختلف لوله و در فواصل مشخص از لوله در خاک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد دو سیستم نزدیک به هم

می‌باشد. زمان و همکاران [۶] عملکرد مبدل حرارتی لوله مستقیم را در سه شهر مختلف در کشور مکزیک بررسی نمودند. شهرها در شرایط آب و هوایی مختلف انتخاب شده است. در مکزیک ضخامت عایق در خروجی مبدل ۰٫۰۵ متر در نظر گرفته می‌شود. این عایق در زمستان با کاهش دمای خروجی از مبدل از عملکرد مبدل کاسته و در تابستان با کاهش دمای خروجی عملکرد مبدل را افزایش می‌دهد. روند تاثیر ضخامت عایق بر روی دمای خروجی از مبدل تابع شرایط آب و هوایی شهرها می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عایق در خروجی از مبدل می‌تواند دمای خروجی را در حالت سرمایش تا ۵°C کاهش دهد. جهت پیش گرمایش هوای ورودی به سیستم تهویه مطبوع گان [۷] از مبدل زمین-هوا مستقیم استفاده نمود. گان [۷] به بررسی اثر متقابل سه محیط مبدل حرارتی، خاک و هوا در عملکرد مبدل پرداخته و نشان داد که در نظر نگرفتن این اثرات می‌تواند منجر به پیش‌بینی عملکرد مبدل کمتر یا بیشتر از میزان واقعی آن گردد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار فلونت و در حالت گذرا انجام شده است. لوله‌ها در عمق ۱٫۵ متری از سطح زمین نصب شده و نمودارهای مربوط به دمای هوای خروجی و حرارت جذب شده در طول لوله در طول ۳۰ روز از ماه به صورت عملکرد متوالی و منقطع رسم شده‌اند. نیبل و همکاران [۸] مبدل حرارتی زمین-هوا لوله مستقیم جهت اهداف سرمایشی در کشور عربستان طراحی نمودند. دما و دبی هوای ورودی با استفاده از یک هیتر و فن در سطوح مورد نظر تنظیم شده و عملکرد مبدل در خاک‌های مختلف بررسی شده است. حداکثر کاهش دمای ۲۱°C را در خاک تراکم بالا بدست آوردند. با کاهش دمای اولیه خاک و افزایش دمای هوای ورودی به مبدل، کاهش دمای بیشتری حاصل می‌گردد. مشاهدات سالانه تغییرات دمای هوای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل، دمای خاک در کشور برزیل توسط واژ و همکاران [۹، ۱۰] انجام شده است. مبدل حرارتی از لوله‌هایی مستقیم تشکیل شده است که در عمق ۱/۶ متری از سطح زمین نصب شده‌اند. در شرایط آب و هوایی مورد بررسی عملکرد حرارتی در حالت سرمایش در ماه فوریه و در حالت گرمایش در ماه می مناسبترین می‌باشد. با مقایسه عملکرد حرارتی مبدل حرارتی لوله مستقیم زمین گرمایی در سه شهر مختلف مکزیک، رامیرز و همکاران [۱۱] نشان دادند که عملکرد حرارتی مبدل حرارتی به نوع آب و هوایی که در آن نصب می‌شود وابسته است. عملکرد حرارتی سرمایشی و گرمایشی مبدل در مناطق متفاوت بوده و در ساختمان‌هایی که در مناطق با دماهای سردتر و گرمتر و در خاک با اثرات اینرسی بالاتر مناسب‌تر می‌باشد. فضلی‌خانی و همکاران [۱۲] عملکرد حرارتی مبدل حرارتی لوله مستقیم را در دو شهر ایران در مناطق آب و هوایی گرم و خشک و سرد در حالت پایدار بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که مبدل حرارتی می‌تواند در کاهش مصرف انرژی سهم به‌سزایی داشته باشد. علاوه بر آن استفاده از مبدل حرارتی می‌تواند باعث بهبود دمای متوسط و نوسانات دمای خروجی از مبدل گردد. در زمستان مبدل می‌تواند باعث افزایش حداکثر ۱۱ و ۱۷٪ در دو آب و هوای گرم و خشک و سرد گردد. در حالیکه عملکرد مبدل در کاهش دما در دو ناحیه منجر به حداکثر کاهش دمای تقریباً یکسانی می‌شود. در آب و هوای گرم و خشک مبدل حرارتی موثرتر می‌باشد و منجر به ذخیره ۶۳/۶٪ انرژی در طول سال می‌شود. این مبدل در آب و هوای سرد حداکثر ۴۷/۹٪ ذخیره انرژی در طول سال دارد.

عملکرد مبدل حرارتی زمین-هوا به جنس خاک وابسته است و اگر محیطی با خواص حرارتی ضعیف نصب گردد باید از لوله‌هایی با طول بیشتر استفاده کرد. یکی از مشکلات در استفاده از مبدل‌های زمین-هوا، حجیم بودن



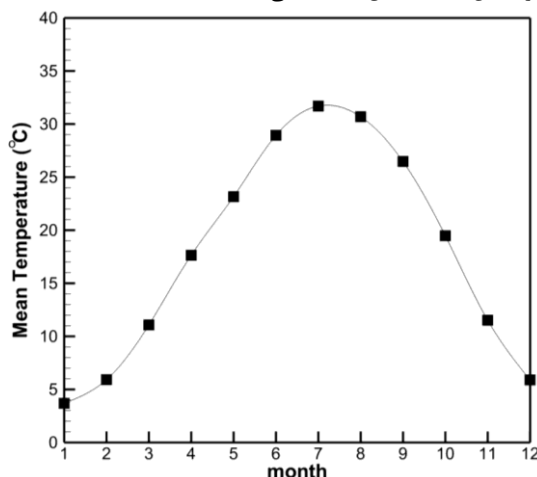
مختلف شبیه سازی شده و عملکرد آن ها از نظر انتقال حرارت و تغییر دمای سیال مقایسه می گردد. جهت گسسته سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم و جهت کوپلینگ معادلات فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در صورتی حل همگراست که باقیمانده معادلات پیوستگی، ممنتم و انرژی از 10^{-5} کمتر گردد. در انجام شبیه سازی ها خواص ترموفیزیکی خاک، لوله و هوا ثابت فرض شده است و از تاثیرات رطوبت بر روی میزان انتقال حرارت صرف نظر می شود. فرض می شود تماس حرارتی مناسبی بین خاک و لوله برقرار است. سرعت هوای ورودی به مبدل های حرارتی برابر با 6 m/s می باشد. شرط مرزی خاک در دوردست، دمای ثابت می باشد و شرط عدم لغزش بر روی دیوارها اعمال می گردد. دیوار لوله و خاک به یکدیگر کوپل شده اند تا انتقال حرارت در طول دیوار مشترک صورت پذیرد. با توجه به اینکه هوا سیالی قابل تراکم است، شرط مرزی خروجی، فشار خروجی، می باشد. خواص حرارتی لوله و خاک بر روی کارایی حرارتی مبدل حرارتی زمین گرمایی تاثیر گذار است. در جدول ۱ خواص خاک شهر تهران و لوله HDPE آورده شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی مواد

چگالی	هدایت حرارتی	ظرفیت حرارتی	
kg/m^3	W/m.K	kJ/kg.K	
958	0.476	2093	خاک
1600	0.52	568.75	لوله HDPE

۳-۱- شرایط اقلیمی دمای هوا و خاک تهران

استان تهران با 18909 کیلومتر مربع مساحت، فضایی معادل $1/2$ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. این استان از نظر موقعیت جغرافیایی در 51 درجه و 17 دقیقه تا 51 درجه و 33 درجه غربی و 35 درجه و 36 دقیقه تا 35 درجه و 44 دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. ارتفاع کنونی از سطح دریا در حدود 900 تا 1800 متر است و از نظر آب و هوایی غیر از نواحی کوهستانی شمالی که اندکی مرطوب و معتدل است، کلا گرم و خشک است. با توجه به آمار 50 ساله هواشناسی در بازه زمانی سال های $1967-2017$ در ایستگاه هواشناسی مهرآباد برای شهر تهران از اوایل آبان تا اواخر فروردین به گرمایش و از اوایل خرداد تا اوایل مهر به سرمایش نیاز خواهیم داشت. متوسط دمای هوای سالانه شهر تهران در شکل ۲ نشان داده شده است. شماره ماه ها بر اساس ماه های سال میلادی می باشد.

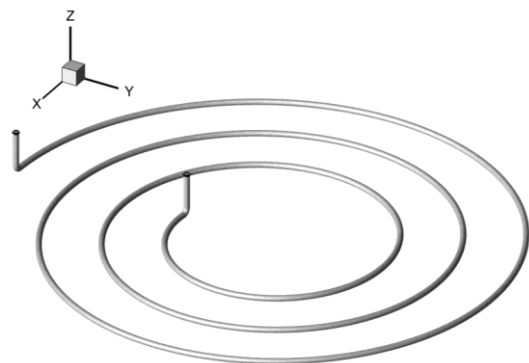


شکل ۲ نمودار تغییرات دمای هوای شهر تهران در طول سال

سیستم می باشد. هرچه طول لوله ها بیشتر باشد، انرژی بیشتری را از زمین دریافت می کند و صرفه جویی بیشتری در میزان مصرف انرژی بدست خواهد آمد. به جهت فضای مورد نیاز کمتر نسبت به لوله های مستقیم، از مبدل های حرارتی نوع مارپیچ می توان در سامانه زمین گرمایی بهره گرفت. هندسه مورد مطالعه در نرم افزارهای مربوطه مدل شده و سپس با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی (FLUENT) شبکه مورد نظر تحلیل می گردد. شبیه سازی ها در دو حالت سرمایشی و گرمایشی در آب و هوای شهر تهران انجام شده و تاثیر عمق دفن شده مبدل، سرعت هوای ورودی به مبدل و دمای هوای ورودی در کارایی مبدل حرارتی لوله مارپیچ اسپیرال بررسی می گردد.

۲- مدل فیزیکی مورد بررسی

شکل ۱ نشان دهنده مبدل های حرارتی زمین گرمایی مورد بررسی می باشد. با توجه به انتقال حرارت بهبود یافته در لوله های مارپیچ نسبت به لوله های ساده، انتقال حرارت در مبدل حرارتی لوله مارپیچ در این پژوهش مورد بررسی قرار می گیرد. فرض می شود لوله های مبدل حرارتی از جنس HDPE به طول، قطر و ضخامت به ترتیب 60 متر، $1/1$ متر و $3/10$ متر می باشند. از آنجا که انتقال حرارت اصلی در مبدل های زمین به هوا در طول های اولیه آن رخ می دهد، جهت جریان سیال ورودی به مبدل مارپیچ از بیرونی ترین حلقه مارپیچ به سمت داخلی ترین حلقه می باشد.



شکل ۱ مبدل حرارتی مارپیچ اسپیرال مورد بررسی

۳- معادلات حاکم و روش حل

با توجه به محدوده دبی جریان و عدد رینولدز، رژیم جریان در هم فرض می شود. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی انسیس-فلونت انجام می گیرد. معادلات حاکم بر سیال به قرار زیر است:

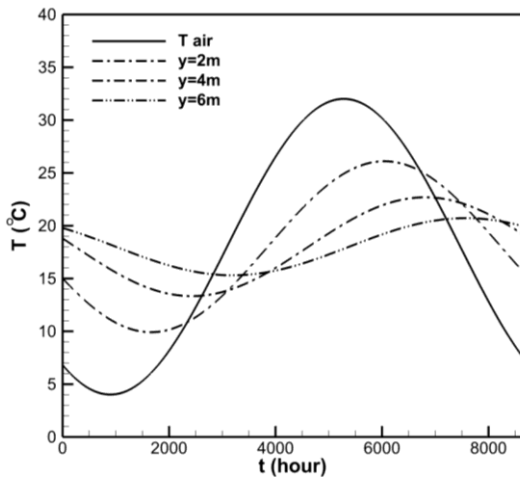
$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\rho (\vec{V} \cdot \nabla) (c_p T_g) - \nabla \cdot (k \nabla T_g) = \Phi \quad (3)$$

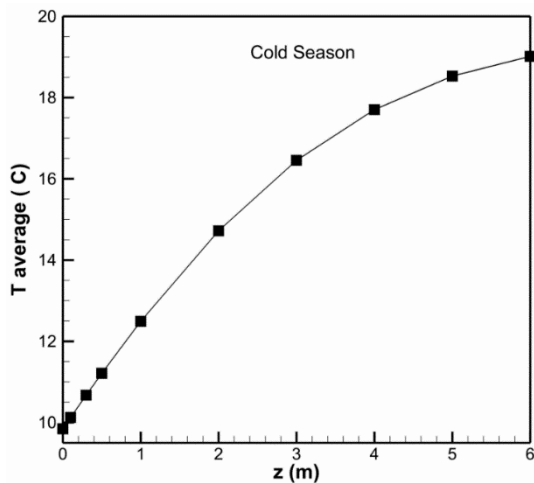
که در آن Φ به اصطلاح منبع حرارت است. که به طور عمده از تلفات اصطکاکی در تماس با قطعات ایجاد می شود. جهت شبیه سازی جریان در هم از مدل درهمی $k - \epsilon - RNG$ استفاده شده است.

با استفاده از ابزارهای شبیه سازی موجود و نرم افزار انسیس-فلونت، انتقال حرارت در مبدل های حرارتی لوله مارپیچ در اعماق خاک و اعداد رینولدز



شکل ۴ نمودار تغییرات دمای سالانه خاک شهر تهران در اعماق $y = 2 - 4 - 6$ متری

با توجه به اینکه مبدل حرارتی جهت استفاده در فصل سرد سال به جهت گرمایش ساختمان و در فصل گرم سال به جهت سرمایش آن مدنظر است، از این نمودارهای در طول فصل سرد و گرم سال شهر تهران متوسط گیری شده و دمای متوسط خاک در هر عمق در فصل سرد و گرم بدست می‌آید. مقدار متوسط دمای زمین در فصل سرد و گرم سال به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که شیب تغییرات دما از ۴ متر بیشتر بسیار کم شده و شکل دارای مجانبی در دمای تقریبی ۲۹۲ کلون در فصل سرما و مجانبی برابر با ۲۹۱ کلون در فصل گرما می‌باشد.

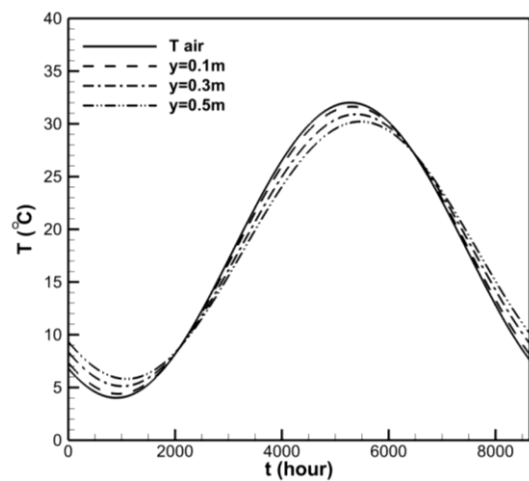


شکل ۵ نمودار تغییرات دمای خاک شهر تهران در فصول سرد

دمای خاک در اعماق مختلف به صورت یک تابع سینوسی بر حسب دمای میانگین هوای سالانه و خواص ترموفیزیکی خاک بدست می‌آید [۱۲]. دامنه تغییرات دما در طول سال در اعماق خاک به صورت ویژه به خاصیت ترموفیزیکی پخش حرارتی وابسته است. هر چه از سطح به سمت اعماق زمین حرکت می‌کنیم، دامنه تغییرات دما کاهش یافته و منحنی تغییرات دما تخت‌تر می‌گردد. دمای خاک مطابق با رابطه (۱) به عمق خاک، زمان مورد بررسی و پخشندگی خاک وابسته است [۱۲]:

$$T(y, t) = T_{mean} + A \cos \left[\omega(t - t_0) - \frac{y}{d} \right] \times \exp\left(-\frac{y}{d}\right) \quad (۴)$$

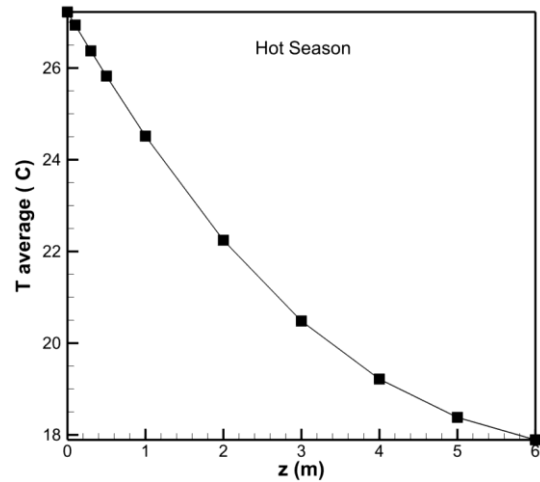
در این رابطه T_{mean} دمای میانگین سالانه هوا، t_0 زمان وقوع گرم‌ترین روز از اول ژانویه، A دامنه موج دمای هوا در طول ۵۰ سال، Z ارتفاعی از خاک زیر سطح زمین (متر)، ω فرکانس موج دمای هوای سالانه می‌باشد. مقادیر T_{mean} با استفاده از داده‌های موجود در سایت سازمان هواشناسی کشور ایران برای شهر تهران بدست می‌آید. نمودار مربوط به تغییرات دمای هوای شهر تهران در اعماق مختلف با توجه به خاک منطقه، داده‌های دمای هوایی و استفاده از رابطه ۴ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در شکل ۳ دمای زمین در اعماق $y = 0.1, 0.3, 0.5$ متری و در شکل ۴ دمای زمین در اعماق $y = 2 - 4 - 6$ متری از سطح زمین به صورت یک موج سینوسی در طول یک سال (میلادی) نشان داده شده است. موج سینوسی دما در طول سال در عمق‌های کم شدید و دامنه تغییرات بالایی دارد. هر چه به سمت اعماق زمین می‌رویم میزان تغییرات دامنه دما کاهش پیدا کرده و تفاوت دمای زمین در گرمترین و سردترین ساعت سال کاهش می‌یابد.



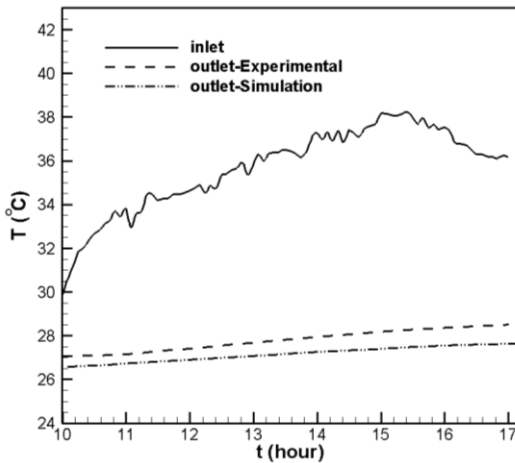
شکل ۳ نمودار تغییرات دمای سالانه خاک شهر تهران در اعماق $y = 0.1 - 0.3 - 0.5$ متری



آن با نتایج آزمایشگاهی [۵] مقایسه می‌شود و در نهایت مدل درهمی $k - \varepsilon - RNG$ با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی به صورت غیر دائم و در شرایط اقلیمی شمال هند انجام شده است، شرایط مرزی و اولیه یکسان با مرجع [۵] به هندسه اعمال و تاثیر مدل‌های مختلف درهمی در دقت جوابها ارزیابی می‌گردد. در شبیه سازی غیر دائم ماتار و همکاران [۵] دمای هوای ورودی به صورت متغییر و با گام زمانی ۵ دقیقه انجام شده است. دمای هوا جهت اعتبارسنجی به صورت مشابه با مرجع به صورت تابع به نرم افزار وارد می‌گردد. نتایج اعتبارسنجی حل در شکل ۸ نشان داده شده است. دمای هوا در فاصله ۵ متری از ورودی لوله و دمای خاک در فاصله شعاعی 0.1 m از سطح لوله اندازه گیری و با نتایج تجربی [۵] مقایسه می‌گردد. نتایج بیانگر تقریب مناسب حل عددی از شرایط آزمایشگاهی [۵] بوده و با حداکثر اختلاف ۰.۵٪ بین دمای شبیه سازی و آزمایشگاهی در مبدل‌های حرارتی مارپیچ از دقت مناسبی برخوردار است. با توجه به اعتبارسنجی انجام شده می‌تون از هندسه، شبکه و روش حل مورد استفاده برای شبیه سازی مبدل در اقلیم شهر تهران استفاده نمود.



شکل ۶ نمودار تغییرات دمای خاک شهر تهران در فصول گرم



شکل ۸ صحت سنجی شبکه بندی و روش محاسباتی

۴- نتایج

جهت بررسی مبدل‌های حرارتی لوله مارپیچ اسپیرال در حالت پایدار شبیه سازیها در اقلیم شهر تهران انجام می‌شود. نتایج به صورت نمودارهای دمای خروجی از مبدل حرارتی، بار حرارتی جذب شده توسط مبدل حرارتی در زمین در دو حالت سرمایش و گرمایش بیان می‌گردد.

۴-۱- بررسی تاثیر عمق دفن شده مبدل حرارتی در خاک

همانطور که در نمودارهای تغییرات دمای خاک نشان داده شده است، تغییرات دمای خاک شهر تهران در عمق‌های ۳ متر تا ۶ متری در هر دو حالت فصل سرد و گرم ۲.۵ درجه می‌باشد. در این بخش فرض می‌شود مبدل‌های حرارتی زمین گرمایی در اعماق ۱ تا ۶ متری زمین قرار گرفته اند. دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در فصول سرد و گرم در شکلهای ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۹ اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی در فصل سرد سال در اعماق ۱ متر، ۳ متر و ۶ متر به ترتیب ۶/۴۸، ۱۳/۶۳ و ۱۴/۹۱ درجه می‌باشد. این اختلاف در فصل گرم (شکل ۱۰) برای اعماق ذکر شده ۵/۲۲، ۱۲/۱۴۶ و ۱۲/۵۲ می‌باشد. به عبارتی مبدل حرارتی مارپیچ پتانسیل افزایش دمای هوای بیرون را در زمستان تا حدود ۱۵ درجه و در

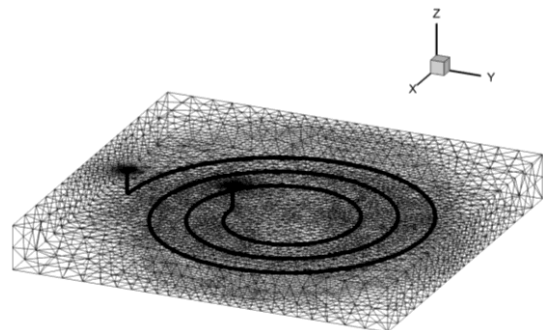
اختلاف دمای بین هوا و خاک در فصول سرد و گرم بیانگر قابلیت استفاده از مبدل‌های زمین به هوا در این شهر می‌باشد و از این مبدل‌ها می‌توان برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها استفاده نمود. ظرفیت گرمایی مبدل حرارتی با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

در این رابطه Q مقدار ظرفیت گرمایی مبدل حرارتی، \dot{m} نرخ جرمی جریان در لوله‌ها، c_p ظرفیت حرارتی هوا و T_{in} ، T_{out} دمای هوای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی زمین گرمایی می‌باشد.

۳-۲- صحت سنجی و استقلال از شبکه

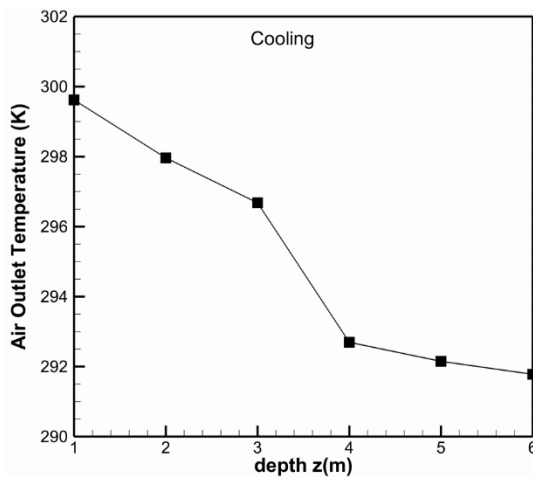
مدل فیزیکی مبدل‌های حرارتی با استفاده از شبکه بندی سه بعدی (چندوجهی و هرمی) به اجزای کوچک تقسیم بندی می‌شود (شکل ۷). جهت بررسی مناسب و دقیق عملکرد مبدل حرارتی، ناحیه محاسباتی به سه بخش هوا، بدنه لوله مارپیچ و زمین تقسیم بندی می‌شود و کل نواحی در شبیه سازی عددی مدل می‌گردند. کل تعداد شبکه محاسباتی ناحیه حل در حدود ۴ میلیون سلول می‌باشد.



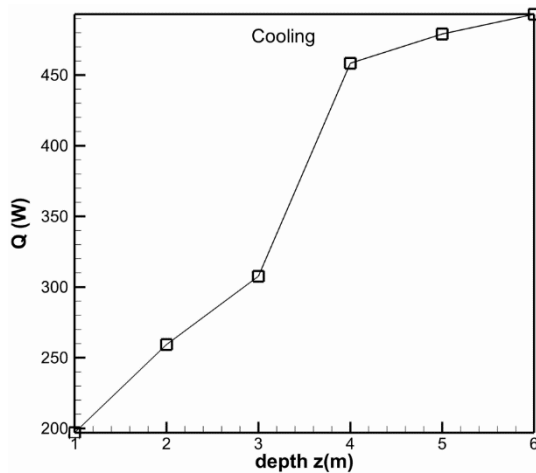
شکل ۷ شبکه بندی ناحیه حل شامل خاک، بدنه مبدل حرارتی و هوا

با توجه به محدوده سرعت ورودی جریان در این بررسی، جریان در محدوده رژیم جریان درهم می‌باشد. سه مدل مختلف درهمی اعمال و نتایج





شکل ۱۰ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد سرمایشی

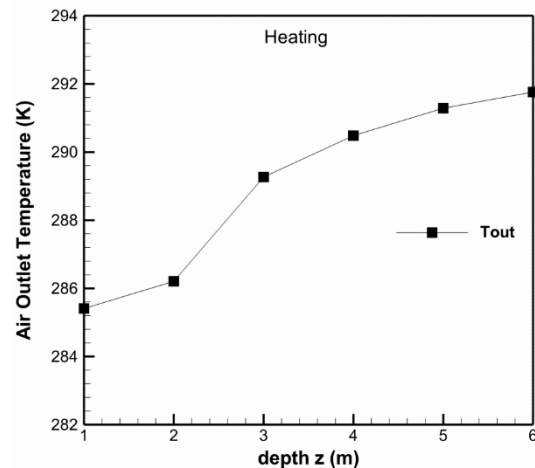


شکل ۱۲ بار برودتی دفع شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ

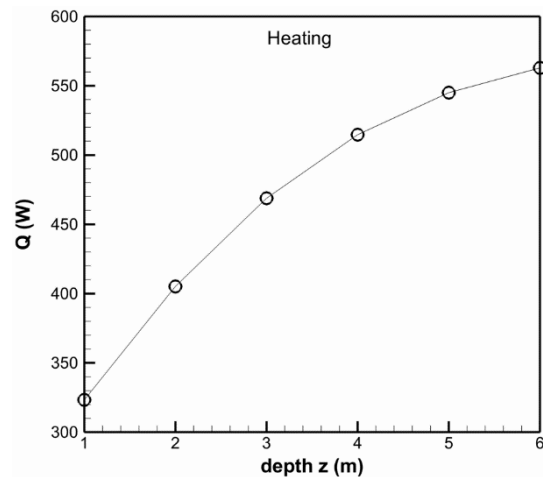
۴-۲- بررسی تاثیر سرعت هوای ورودی به مبدل

با توجه به محدوده سرعت ورودی مبدل حرارتی، رژیم جریان در لوله درهم می‌باشد. مدل مناسب درهمی در این پژوهش $k - \epsilon - RNG$ انتخاب شده است. با توجه به عملکرد مناسب مدل درهمی $k - \epsilon$ در اعداد رینولدز بالا می‌توان بررسی را در سرعت‌های بالاتر ورودی و با اطمینان از درستی حل عددی انجام داد. تاثیر سرعت هوای ورودی در دمای خروجی از مبدل حرارتی، بار حرارتی جذب شده مبدل حرارتی اسپیرال در شکل‌های ۱۳-۱۶ نشان داده شده است. افزایش سرعت جریان باعث کاهش زمان ماند هوا در طول مبدل حرارتی در خاک شده و در زمستان سبب کاهش دمای خروجی از مبدل و در تابستان سبب افزایش دمای هوای خروجی از مبدل می‌گردد. با این حال افزایش سرعت باعث افزایش دبی جرمی جریان و ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا روی بدنه داخلی لوله شده و نهایتاً افزایش انتقال حرارت بین خاک و هوا می‌شود.

تابستان پتانسیل کاهش دما تا ۱۳ درجه را دارد. با توجه به شکل ۱۱ با تغییر عمق از ۲ به ۴ متر بار حرارتی جذب شده ۴۵٪ افزایش می‌یابد و با تغییر عمق از ۴ متر به ۶ متر این افزایش تنها ۹٪ است. با افزایش عمق دفن مبدل حرارتی در خاک، دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی و بار حرارتی جذب شده افزایش می‌یابد که به دلیل اختلاف دمای بیشتر بین هوا و خاک و انتقال حرارت بیشتر بین خاک و لوله می‌باشد. به همین ترتیب، در فصول گرم (شکل ۱۲) با توجه افزایش بیش از ۷۰٪ بار برودتی دفع شده از هوا در مبدل حرارتی با افزایش عمق از ۲ متر به ۴ متر، و لیکن با توجه به روند کاهشی میزان حرارت جذب و دفع شده از ۴ متر به ۶ متر، در ادامه مراحل شبیه‌سازی فرض می‌شود کلیه مبدل‌ها در عمق ۴ متر نصب شده‌اند.

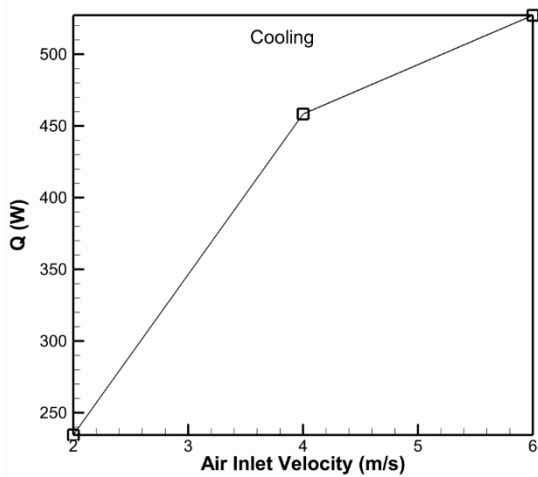


شکل ۹ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد گرمایشی

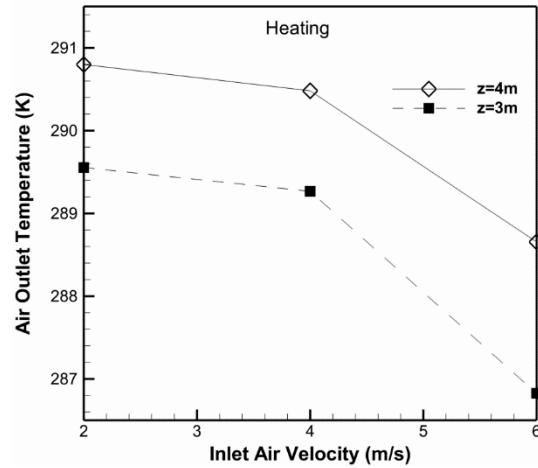


شکل ۱۱ بار حرارتی جذب شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ



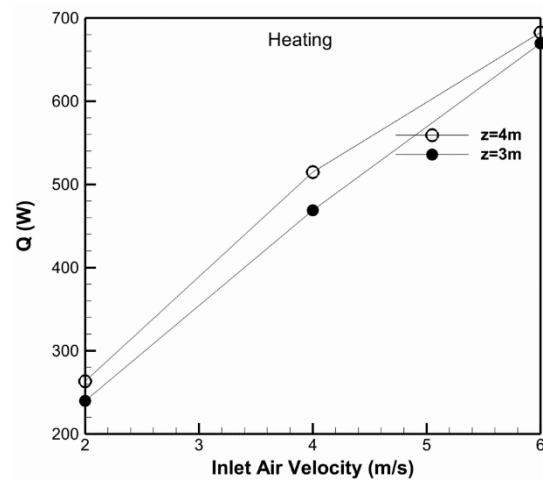
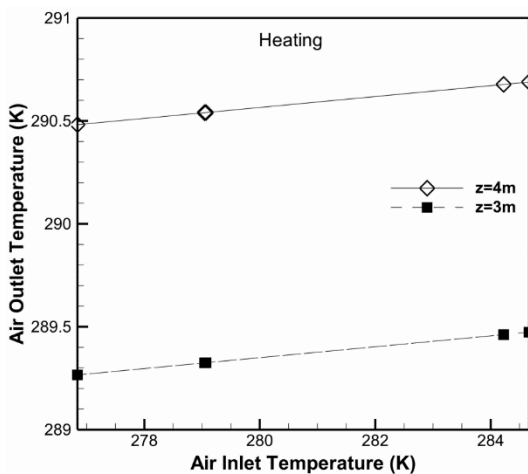


شکل ۱۶ بار برودتی دفع شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ

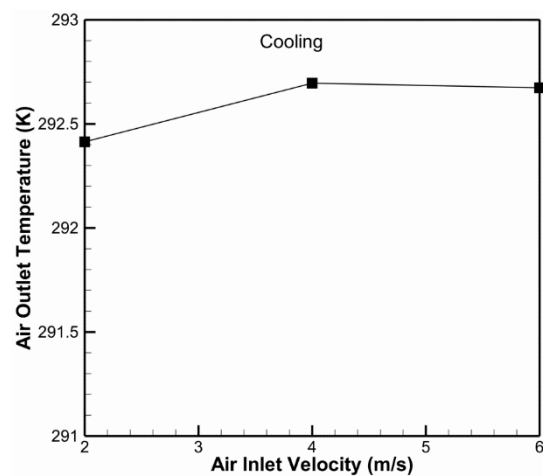


شکل ۱۳ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد گرمایشی

۴-۳- بررسی تاثیر دمای هوای ورودی به مبدل در این بخش از شبیه سازی فرض شده مبدل حرارتی در دو عمق ۳ و ۴ متری از زمین نصب شده و سرعت هوای ورودی به مبدل در تمامی حالات 4 m/s می باشد. دمای هوای ورودی به مبدل بر اساس متوسط دمای هوای ماه های سرد و گرم سال در یک بازه ۵۰ ساله بدست می آید. به عنوان مثال در ماه نوامبر متوسط دمای هوای ۵۰ سال اخیر شهر تهران $284/664$ کلوین است و در ماه ژانویه این دما به حداقل خود برابر با 276 کلوین می رسد. در فصل گرم نیز به همین ترتیب دماها در یک بازه ۵۰ ساله متوسط گیری شده است و به عنوان مثال گرم ترین ماه، ماه جولای با دمای $304/84$ کلوین می باشد. تاثیر دمای هوای ورودی به مبدل در دمای خروجی هوا از مبدل در شکل های ۱۷ و ۱۸ نمایش داده شده است. در عمق ۴ متری، تقریباً در تمامی دماهای ورودی، در زمستان دمای خروجی 289 کلوین و در تابستان این دما 292 کلوین می باشد. لیکن میزان حرارت اکتسابی از زمین و یا دفع شده به آن با دمای ورودی رابطه دارد. در شکل ۱۹ با افزایش دمای هوای ورودی به مبدل حرارت اکتسابی از زمین کاهش و در شکل ۲۰ با کاهش دمای ورودی به مبدل، میزان حرارت دفع شده از هوا به زمین کاهش می یابد.

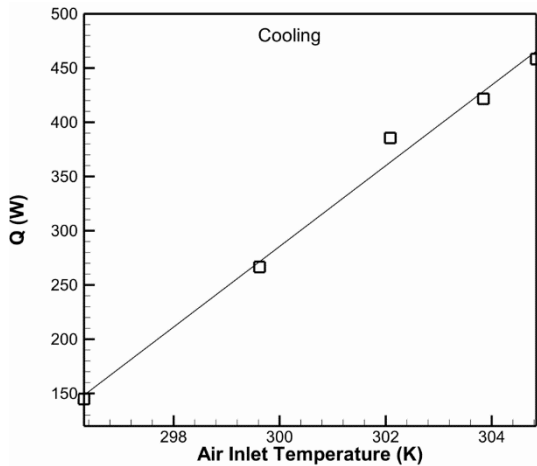


شکل ۱۵ بار حرارتی جذب شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ



شکل ۱۴ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد گرمایشی





شکل ۲۰ بار برودتی دفع شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ

۵- نتیجه‌گیری

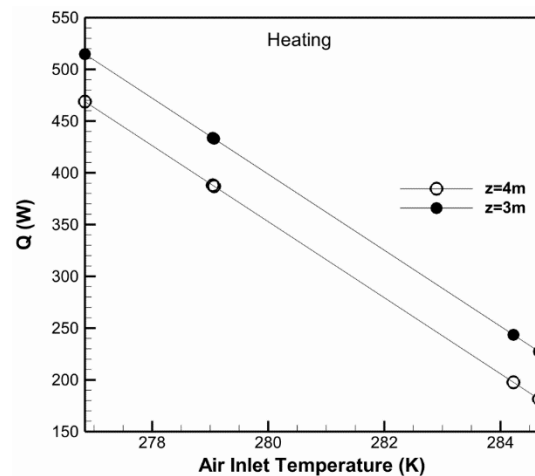
در این پژوهش به بررسی استفاده از مبدل حرارتی زمین گرمایی لوله ماریچ اسپیرال در شرایط آب و هوایی شهر تهران پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو حالت سرمایش و گرمایش انجام شده و میزان حرارت دریافت و یا دفع شده مبدل از زمین بدست آمده است. دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی، میزان حرارت جذب و یا دفع شده مبدل در شرایط مختلف از جمله عمق نصب مبدل، دما و سرعت هوای ورودی بدست آمده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار آنسیس-فلوئنت به صورت سه بعدی در شرایط پایدار و در دمای متوسط فصول گرم و سرد انجام شده است. جهت بدست آوردن دمای خاک در عمق‌های مختلف از داده‌های شهر تهران و رابطه‌ای سینوسی بر اساس خواص ترموفیزیکی خاک و دمای هوای متوسط استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش شیب تغییرات دما در اعماق بیشتر از چهار متر بسیار کم شده و پرویل دما بر حسب عمق دارای مجانبی در دمای تقریبی ۲۹۲ کلوین در فصل سرما و ۲۹۱ کلوین در فصل گرما می‌باشد. میزان تغییرات بار حرارتی اکتسابی از زمین با عمق دفن مبدل در خاک رابطه دارد، لیکن با افزایش عمق بیشتر از ۴ متر میزان افزایش بار حرارتی جذب شده به شدت کاهش می‌یابد؛ و مناسب‌ترین عمق جهت نصب مبدل حرارتی در ۴ متر می‌باشد. با افزایش سرعت جریان در لوله مبدل زمین گرمایی میزان انرژی حرارتی مبادله شده افزایش و دمای هوای خروجی کاهش می‌یابد. با افزایش دمای هوای ورودی به مبدل زمین به هوا در تابستان بار حرارتی دفع شده افزایش و در زمستان سبب کاهش بار حرارتی جذب شده از زمین می‌گردد. نتایج بیانگر پتانسیل خوب استفاده از مبدل حرارتی زمین-هوای اسپیرال در شهر تهران می‌باشد.

فهرست علائم

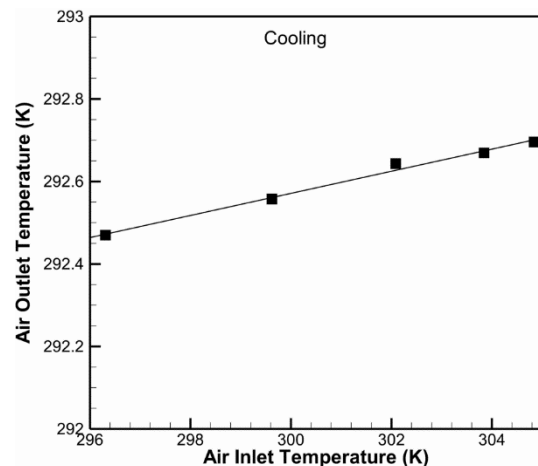
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
Pr	عدد پرانتل
Q	انتقال حرارت (W)
t	زمان (s, hour)
T	دما (K)
V	سرعت (m/s)
y, z	عمق خاک (m)

علائم یونانی

شکل ۱۷ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد گرمایشی



شکل ۱۹ بار حرارتی جذب شده توسط هوا در مبدل حرارتی ماریچ



شکل ۱۸ دمای هوای خروجی از مبدل حرارتی در حالت عملکرد گرمایشی

c_p ظرفیت حرارتی (J/kg.K)

μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ρ چگالی (kgm^{-3})

زیرنویس‌ها

ave مقدار متوسط

in ورودی

out خروجی

۱- مراجع

- [۱] ع.ا. سبزیپور، طبری ح.، علی آ.، برآورد میانگین روزانه دمای خاک در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از داده های هواشناسی، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۱۳۸۹
- [۲] ا. علیزاده، محمدیان ا.، موسوی ج.، بررسی رابطه دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک و برآورد عمق یخبندان (مطالعه موردی استان خراسان رضوی)، آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۸۷
- [۳] م. کریمپور، یار مرادی ز.، بررسی روند تغییرات دمای اعماق خاک در ایستگاه خرم آباد، فصلنامه علوم و مهندسی محیط زیست، ۱۳۹۳
- [۴] پ. نصرالدین، صفر م.، برآورد دمای عمق های مختلف خاک از دمای هوا با بکار گیری روابط رگرسیونی، شبکه عصبی و شبکه عصبی-فازی (مطالعه موردی: منطقه کرمانشاه)، دانش آب و خاک (دانش کشاورزی)، ۱۳۹۰
- [5] A. Mathur, Mathur S., Agrawal G., Mathur J., Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes, Renewable Energy, Vol., pp. 474-87, 2017.
- [6] J. Xamán, Hernández-Pérez I., Arce J., Álvarez G., Ramírez-Dávila L., Noh-Pat F., Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation, Energy and Buildings, Vol., pp. 356-61, 2014.
- [7] G. Gan, Simulation of dynamic interactions of the earth-air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air, Applied energy, Vol., pp. 118-32, 2015.
- [8] N. A. Elminshawy, Siddiqui F. R., Farooq Q. U., Addas M. F., Experimental investigation on the performance of earth-air pipe heat exchanger for different soil compaction levels, Applied Thermal Engineering, Vol., pp. 1319-27, 2017.
- [9] J. Vaz, Sattler M. A., Brum R. d. S., dos Santos E. D., Isoldi L. A., An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (EAHE), Energy and Buildings, Vol., pp. 122-31, 2014.
- [10] J. Vaz, Sattler M. A., dos Santos E. D., Isoldi L. A., Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger, Energy and Buildings, Vol., pp. 2476-82, 2011.
- [11] L. Ramírez-Dávila, Xamán J., Arce J., Álvarez G., Hernández-Pérez I., Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates, Energy and Buildings, Vol., pp. 238-48, 2014.
- [12] F. Fazlikhani, Goudarzi H., Solgi E., Numerical analysis of the efficiency of earth to air heat exchange systems in cold and hot-arid climates, Energy Conversion and Management, Vol., pp. 78-89, 2017.

