

Research Paper

Numerical Simulation of a Novel Spiral Type Ground Heat Exchanger for Enhancing Heat Transfer Performance of Geothermal Heat Pump

Reza Saeidi*, Javad Aghaz

Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 10 January 2022

Revised 29 January 2022

Accepted 24 March 2022

Keywords:

Heat Transfer

Vertical Ground Heat Exchanger

Geothermal Heat Pump

ABSTRACT

The spiral type one is more prominent, of which the vertical type ground heat exchange (GHE) is the most common in ground source heat pumps (GSHP) and on the purpose of this study as well. The present paper provides numerical simulation for 1D-3D model of the ground source heat pumps in cooling mode by using COMSOL environment. In contrary to popular spiral models, this model is designed with a low depth and high diameter with special metal rods (Fins). The simulated spiral pipe has 10 m in depth and 1 m in diameter. In order to compensate for the reduction in heat transfer due to the lower depth, the effect of different parameters such as velocity, pitch, thermal conductivity, and specific heat capacity in backfill material and ground on the heat performance is investigated. Furthermore, different velocity range is recommended for several pitches. In addition, as a novelty, an innovative design is modeled consisting of diverse type of horizontal aluminum rods (Fins) in the soil connected to the pipe completely (Finned pipe). The fins not only hold the pipe inside the ground firmly but also improve the heat transfer rate due to the area increase and the high thermal conductivity system up to 31%.

1. Introduction

The vertical type has several models such as u-type and spiral that are utilized owing to some circumstances in which the borehole drilling cost is of significance. In many countries, particularly Iran, the drilling is costing a fortune where the spiral tube with long length and shallow depth is the best solution. Furthermore, for the countries where the tube and installation costs are more than the drilling, the u-type is a great decision.

The geothermal spiral tube with high diameter and low depth is investigated. The low depth of the well is compensated by reinforcing the heat exchange which is mainly happened at the high-temperature difference. There exist many variables to achieve the high heat transfer such as, thermal conductivity, specific heat, soil, backfill material, and using the aluminum pipes.

2. Methodology

The numerical model has been implemented in the

commercial software COMSOL Multiphysics. Regarding the mathematical methodology, the 1D-3D model is used for this paper. Therefore, the 1D spiral pipe is considered for heat and mass transfer in a 3D borehole.

3. Model validation

The current model is verified and validated from two papers which utilized the spiral tube. As for the validation of the 1D-3D model, the experimental data gathered using Dehghan B. works and the verification emerges from the study conducted by Carotenuto et al. [3]. which applied the COMSOL software for the 1D-3D model.

4. Results and Discussion**4.1 The impact of rod on the soil and its heat transfer**

Given that, the diameter of the borehole is 1 meter; it is relatively large compared to the boreholes used in GSHP. Therefore, we can manually put the rods into the ground, which has two major advantages: first, it is possible to use the rods as firmly hold the pipe; second, if the rod is made of aluminum or copper or

* Corresponding Author, Email: Reza.saeedee@ut.ac.ir

metal with high thermal conductivity, the transferred and taken heat can increase by the soil volume.

4.2 The backfill material and soil affect systems

The thermal conductivity changes with fixed cp at both backfill material and soil is 0.5 to 5. It is clearly observed that, unlike the u-type systems, by increasing the thermal conductivity, the soil impact is more than the backfill material, which is found in both cases with the rod and without the rod. When the thermal conductivity of the backfill material and ground increases from 0.5 to 2 W/m.K the heat transfer rate increases of about 40% and 48% respectively.

5. Conclusion

The effect of aluminum rods inside the ground is

assessed in order to involve more volume of the soil for heat exchange between pipe and soil and finally rising the system performance. Some controversial deductions are listed as bellow: The most impressive factor for GHE inlet and outlet temperature difference is determined to be the borehole depth whereas the pitch, rod length, and the number of turns have less impact. Applying 120 aluminum rods horizontally to the soil, in contact with GHE, the heat transfer is improved. By examining 5 types of rods, we were able to create 0.84 °C increase in temperature difference, which enhanced the heat transfer by 31%.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی برای تحلیل پارامترهای گوناگون مبدل حرارتی زمینی به منظور افزایش عملکرد هیت پمپ زمین‌گرمایی

رضا سعیدی*، جواد آغاز

گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۰۹ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۱/۰۴	انتقال حرارت بین مبدل حرارتی زمین‌گرمایی و خاک در سیستم‌های هیت پمپ زمین گرمایی نقش اساسی در بازده کلی سیستم دارد. از این‌رو، در این مقاله با اضافه کردن موادی با ضریب انتقال حرارت بالا در مبدل‌های حرارتی عمودی مارپیچ، اثر آن‌ها روی بازده و دمای خروجی مبدل حرارتی بررسی شد. مقاله حاضر با استفاده از محیط COMSOL شبیه‌سازی عددی را برای مدل ۱ بعدی-۳ بعدی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی در حالت خنک‌کننده ارائه می‌کند. به خلاف مدل‌های مارپیچی رایج، این مدل با عمق کم و قطر زیاد با میله‌های فلزی مخصوص (Fins) طراحی شده است. لوله مارپیچ شبیه‌سازی شده دارای عمق ۱۰ متر و قطر ۱ متر است. به منظور جبران کاهش انتقال حرارت ناشی از عمق کمتر، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله گام، هدایت حرارتی بر عملکرد حرارتی بررسی شده است. همچنین، به عنوان یک نوآوری، نوعی طرح نوآورانه متشکل از انواع متنوع میله‌های آلومینیومی افقی (Fins) در خاک متصل به لوله کاملاً (Finned pipe) مدل‌سازی شده است. پره‌ها نه تنها لوله را در داخل زمین محکم نگه می‌دارند، بلکه سرعت انتقال حرارت را به دلیل افزایش مساحت و سیستم هدایت حرارتی بالا تا ۳۱ درصد بهبود می‌بخشند.

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت مصرف انرژی در جهان امروز، علاوه بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، محققان در حال بررسی چگونگی بهبود عملکرد این سیستم‌ها هستند تا بتوانند با انرژی‌های فسیلی، به‌ویژه در کشورهای تولیدکننده نفت و گاز، رقابت کنند [۱]. این مقاله بر پمپ حرارتی زمین گرمایی، در میان منابع انرژی تجدیدپذیر متعدد و فناوری‌های مرتبط تمرکز دارد. به طور گسترده پذیرفته شده است که سیستم‌های پمپ حرارتی منبع زمینی

(GSHP) به‌صرفه‌ترین، کم‌مصرف‌ترین و دوستدار محیط زیست برای پمپ‌های حرارتی هستند. این منبع می‌تواند نیازهای گرمایش، سرمایش و آب گرم ساختمان را از طریق نصب مبدل‌های حرارتی زمینی (GHE) تأمین کند. مبدل‌های زمین‌گرمایی از مهم‌ترین اجزای این سیستم هستند [۲ و ۳] زیرا به طور مستقیم با راندمان انتقال حرارت در ارتباط هستند و تأثیرات مهمی بر هزینه کل سیستم دارند، به‌ویژه در کشورهایی با هزینه‌های حفاری زیاد که قیمت در آن‌ها افزایش می‌یابد، بسته به شرایط مختلف از انواع مختلف عمودی و افقی آن استفاده می‌کنند. در سیستم‌های عمودی از انواع مدل از جمله u - type و یا spiral استفاده می‌شود که به نسبت شرایط می

* نویسنده مسئول

Email: Reza.saeedee@ut.ac.ir

توان از این سیستم‌ها استفاده کرد. یکی از این شرایط، هزینه حفر چاه (borehole) است. در بعضی از کشورها مانند ایران که هزینه حفاری زیاد است، می‌توان بیشتر از لوله مارپیچ که طول لوله بیشتر و عمق کمتری دارد، استفاده کرد [۴-۷].

انتخاب سرعت سیال داخلی لوله، از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین فاکتورها در بازده حرارتی مبدل‌های گرمایی تأثیر سرعت سیال روی فاکتورهای مهمی از جمله نرخ انتقال حرارت، افت فشار، طول لوله، اختلاف دما بین خروجی و ورودی سیال، مقاومت حرارتی و تداخل حرارتی اثر می‌گذارد [۸ و ۹]. با افزایش سرعت سیال، نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. سپس، با افزایش سرعت از ۰/۲ به ۱ متر بر ثانیه انتقال حرارت به میزان ۴۳ درصد افزایش می‌یابد [۱۰]. شیب انتقال حرارت در مقایسه با سرعت با سه مدل مختلف مارپیچ حلقوی و خطی بررسی شده است که با تغییر سرعت از ۰/۵ به ۱ متر بر ثانیه شیب نرخ انتقال حرارت بیشتر از حالت شیب خط از ۰/۲۵ به ۰/۵ متر بر ثانیه است [۱۱]. در تحقیقات دیگر، هنگامی که سرعت از ۰/۲ به ۰/۸ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، نرخ تبادل حرارت تقریباً ۸۶ درصد افزایش می‌یابد [۱۲].

قطر لوله بستگی به عوامل مختلف دارد، از جمله کشوری که سیستم در آن نصب می‌شود. به طور مثال معمولاً برای سیستم‌های افقی کویل زمین گرمایی در آمریکا و کانادا با اروپا و انگلستان متفاوت است، به طوری که در آمریکا و کانادا اندازه قطرهای ۱۵، ۲۰ و ۳۲ میلی‌متر است و در اروپا و انگلستان از قطرهای استاندارد ۴۰، ۳۲ و ۴۰ میلی‌متری استفاده می‌کنند [۱۳]. همچنین، با بررسی ۲ نوع قطر لوله مختلف در حالت مارپیچ مشاهده شد استفاده از لوله با قطر ۳۲ میلی‌متر نسبت به ۲۵ میلی‌متر افزایش ۳۲ درصدی در بازده حرارتی دارد، زیرا قطر لوله بزرگ باعث افزایش مساحت ناحیه تبادل حرارتی و در نتیجه، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [۱۴].

گام در مقاله‌های مختلف، تعریف‌های متفاوتی دارد، اما منظور ما در اینجا فاصله بین ۲ حلقه است. البته، در حالت افقی و در نوع مارپیچ فاصله مرکز به مرکز را گام حلقه می‌گویند. پارامترهای مختلفی از جمله طول لوله به گام وابسته‌اند. با کاهش گام، طول لوله در عمق چاه یکسان افزایش می‌یابد. برای مثال، وقتی گام ۶، ۴ و ۲ سانتی‌متر

است، انتقال حرارت به ترتیب ۲۰۰، ۲۵۰ و ۲۷۰ W است [۱۵]. در بررسی‌های دیگر تبادل حرارتی برای گام با اندازه ۲۰۰ میلی‌متر فقط ۱/۲ مرتبه بیشتر از ۵۰۰ میلی‌متر است [۱۶ و ۱۷]. برای لوله افقی در حالت مارپیچی اگر نسبت گام بر قطر اصلی ۱ لوله باشد؛ تبادل حرارت در واحد طول ۱۰۰ - ۱۵۰ درصد بیشتر از گام ۰/۲ است اما نرخ انتقال حرارت، ۱۰ - ۴۰ درصد در حالت گام با اندازه نسبت یک ۱ کمتر از ۰/۲ است [۱۸].

برای بالا بردن سطح رسانایی گرمایی لوله پلی‌اتیلن چگال بالا را می‌توان با آلومینیوم ترکیب کرد که رمضان و همکاران در این تحقیق با اضافه کردن سیم‌های آلومینیوم به داخل لوله پلی‌اتیلن چگال بالا به تعداد مختلف و قطرهای مختلف ضریب حرارتی را بررسی کرده‌اند که نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد رسانش گرمایی به تعداد و سیم‌ها و قطر آلومینیوم وابسته است و از ۲۵ تا ۱۵۰ درصد می‌تواند تغییر کند [۱۹]. در تحقیقاتی که در گذشته انجام شده است، توجه بسیاری روی لوله‌های U شکل شده که در ایران از نظر اقتصادی به صرفه نیست. همچنین، برای بالا بردن بازده سیستم هیت پمپ زمین گرمایی بیشتر روی تغییر در خود سیستم تأکید شده است؛ از جمله تغییر در جنس لوله یا قطر لوله و به اضافه کردن مواد در داخل خاک یا چاه و یا داخل لوله که بتوان رسانش گرمایی را بالا ببرد و بازده سیستم را افزایش بدهد، پرداخته نشده است [۲۰-۲۳].

این تحقیق شبیه‌سازی عددی برای تحلیل پارامترهای گوناگون مبدل حرارتی زمینی به منظور افزایش عملکرد هیت پمپ زمین گرمایی است. به بیانی، هدف اصلی این تحقیق، بالا رفتن بازده هیت پمپ زمین گرمایی است. در نتیجه، در گام اول پارامترهای مختلف مبدل حرارتی زمینی بررسی می‌شود. سپس، بر اساس بررسی‌های انجام گرفته مدلی برای این تحقیق طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به هزینه بیش از حد حفر چاه عمیق در ایران، در این پروژه قصد داریم که مدل مبدل‌ها را به صورت کامل تغییر بدهیم، به گونه‌ای که چاه کم‌عمق و حدود ۱۰ تا ۱۵ متر کنده شود و قطر آن نسبت به مدل‌های معمول بیشتر و حدود ۱ متر باشد و همچنین میله‌های فلزی داخل این چاه قرار می‌گیرد تا به کمک آن سرعت انتقال را بیشتر کنیم و میزان مساحت انتقال حرارت در زمین را افزایش دهیم.

۲. روش تحقیق و مدل سازی عددی

معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر مدل شبیه سازی شده در کامسول را تعریف می کنیم.

معادله پیوستگی: در رابطه ۱ معادله پیوستگی نوشته شده است.

$$\frac{\partial(A_{pipe}\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(A_{pipe}\rho u_f)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در رابطه ۱ u_f سرعت سیال است، ρ چگالی را نشان می دهد و مساحت سطح مقطع با A_{pipe} نمایش داده شده است.

معادله ممنتوم: رابطه ۲ معادله ممنتوم را نشان می دهد.

$$\frac{\partial(\rho u_f)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - f_D \frac{\rho_f}{2D_h} u_f |u_f| + F \quad (2)$$

p (SI unit: N/m²) فشار است و F (SI unit: N/m³)

یک نیرو همانند جاذبه است.

معادله انرژی: رابطه ۳ معادله انرژی را نشان می دهد.

$$\frac{\partial(\rho_f A_{pipe} c_f T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f A_{pipe} c_f u_f T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_{pipe} k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f_D \frac{\rho}{2D_h} |u_f|^3 + Q_{wall} \quad (3)$$

ρ_f چگالی سیال را نشان می دهد، c_f (J/(kg·K)) ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت است؛ T (K) دما، k_f (W/(m·K)) رسانندگی گرمایی است. D_h قطر هیدرولیکی در لوله است. Q_{wall} (SI unit: W/m) چشمه/چاه که انتقال حرارت در اطراف دیواره لوله اتفاق می افتد که در رابطه ۴ نشان داده شده است.

$$Q_{wall} = hZ(T_{ext} - T_0) \quad (4)$$

معادله حاکم برای انتقال حرارت خاک، مواد پرکننده چاه و پره که به صورت جامد هستند در رابطه ۵ نمایش داده شده است:

$$\rho_s c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_s \nabla T) \quad (5)$$

ρ_s چگالی و k_s رسانندگی گرمایی خاک، مواد پرکننده و پره اند.

نرخ انتقال حرارت را می توان با استفاده از معادله ۶ محاسبه کرد.

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (6)$$

$\dot{m}$ دبی جرمی است سیال است، گرمایی ویژه سیال، T_{out} دمای خروجی سیال و T_{in} دمای وارد شده سیال به لوله است. اگر به جای دبی جرمی سرعت داده شود، از فرمول ۷ نیز می توان استفاده کرد.

$$\dot{Q} = \rho U A c_p (T_{in} - T_{out}) \quad (7)$$

که U سرعت سیال داخل لوله است و A مساحت سطح مقطع لوله.

نرخ انتقال حرارت در واحد لوله (رابطه ۸):

$$Q_L = \frac{\dot{Q}_{comp}}{L} \quad (8)$$

Q_L نرخ انتقال حرارت در واحد چاه و L عمق چاه کنده شده است.

حل یک بعدی - سه بعدی در کامسول

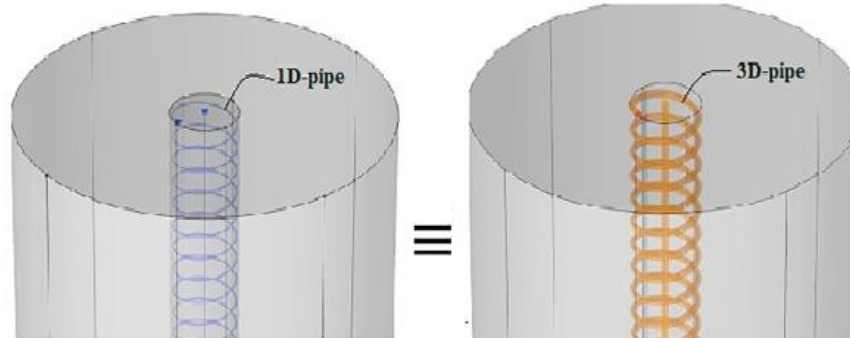
یک روش برای شبیه سازی در کامسول مدل یک بعدی - سه بعدی است که به تازگی وارد کامسول شده است. کامسول برای مبدل های زمین گرمایی پیشنهاد داده است از این روش استفاده شود. لوله را به صورت یک خط مارپیچ بدون قطر داخلی و خارجی (در اصطلاح یک بعدی) داخل یک چاه به صورت سه بعدی قرار داده ایم و قطر داخلی و خارجی و مشخصات لوله را در قسمت مشخصات لوله وارد می کنیم که کامسول در محاسبات این اعداد را در نظر می گیرد و در نهایت مانند شکل ۱ به صورت سه بعدی نمایش می دهد.

فیزیک مسئله

خود لوله با فاصله گام های ۰/۵، ۰/۳۳، ۰/۲ و ۰/۱ متر استفاده شده است و چاه کنده شده به عمق ۱۰ و ۱۵ متر است و قطر چاه ۱ متر در نظر گرفته شده است. لوله با قطر داخلی ۳۲ میلی متر و ضخامت ۳ میلی متر استفاده شده است. عمق خاک برای عمق چاه ۱۰ متر و ۱۵ متر به ترتیب ۱۲ و ۱۷ متر در نظر گرفته شده و قطر خاک ۵ متر است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای لوله برگشت از مرکز لوله مارپیچ ایجاد شده است. با توجه به شکل ۲ در هر حلقه با ۴ میله در ارتباط

است که هر میله نسبت به هم ۹۰ درجه فاصله دارد که ۱۲۰ میله وارد زمین شده است. ۵ نوع میله با طول و قطرهای مختلف بررسی شده که جنس پره ها از آلومینیوم است. در جدول ۲ مشخصات پره‌ها نشان داده شده است. برای طراحی مدل از دو نرم‌افزار سالی‌دورک و

است که هر میله نسبت به هم ۹۰ درجه فاصله دارد که ۱۲۰ میله وارد زمین شده است. ۵ نوع میله با طول و قطرهای مختلف بررسی شده که جنس پره ها از آلومینیوم است. در جدول ۲ مشخصات پره‌ها نشان داده شده است. برای طراحی مدل از دو نرم‌افزار سالی‌دورک و



شکل ۱. نمایی از مدل یک‌بعدی که در حالت شبیه‌سازی به سه‌بعدی تغییر می‌یابد

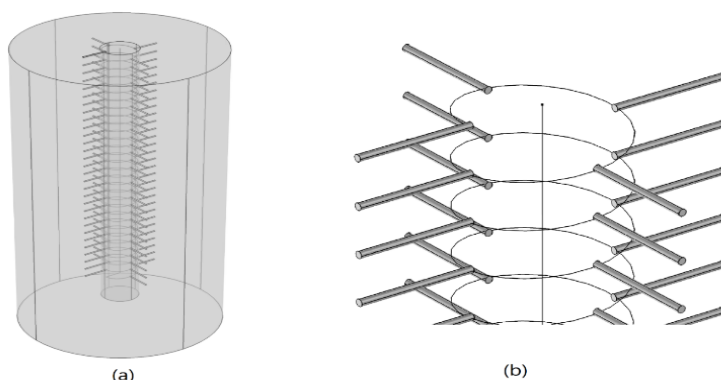
جدول ۱. پارامترهای مختلف در مدل‌سازی

پارامتر	اندازه	تعریف
r_{pi}	16	شعاع داخلی لوله [mm]
r_{po}	17.5	شعاع خارجی لوله [mm]
L_{pipe}	10	طول عمودی لوله مارپیچ [m]
D	1	قطر اصلی چاه مارپیچ [m]
L_p	0.1, 0.2, 0.33, 0.5	طول گام [m]

جدول ۲. مشخصات پره‌های داخل خاک

حالت	شکل	قطر (m)	ارتفاع (m)
1		۰,۰۳	۰,۵
2		۰,۰۳	۱
3		۰,۰۵	۰,۵
4		۰,۰۵	۰,۷۵
5		۰,۰۷	۰,۵

سعیدی و آغاز: مدل سازی عددی برای تحلیل پارامترهای گوناگون مبدل حرارتی زمینی به منظور ...



شکل ۲. نمای کلی مدل پره دار

- شرایط اولیه و شرایط مرزی اضافه می شود.
- مدل مش بندی می شود.
- در قسمت study بازه زمانی (time step) مشخص می شود و گام زمانی اولیه (initial step) را ۰/۰۰۱۵ ثانیه و ماکزیمم گام زمانی را ۶۰۰ ثانیه همچنین relative tolerance را ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

ویژگی و جنس مواد

بعد از طراحی مدل ها، باید به هر ناحیه جنس و ویژگی مواد اضافه شود. جنس مواد با توجه به جدول ۳ به نواحی مختلف اضافه شده است. هرچند ویژگی های خاک و مواد پرکننده در قسمتی از این تحقیق تغییر می کند، ولی در شرایطی که دیگر پارامترها تغییر کنند، از ویژگی این مواد استفاده می شود.

جدول ۳. جنس و ویژگی مواد به کاررفته در شبیه سازی

پره	لوله	سیال (آب)	مواد پرکننده	خاک	واحد	نماد	ناحیه ویژگی
آلومینیومی							
2707	۹۵۰	998	2500	1950	(kg/m ³)	ρ	چگالی
204.2	۰,۴۵	0.60	1.8	1.5	(W/ K)	k	رسانش گرمایی
896	۲۳۰۰	4181.5	880	800	(J /kg. K)	c_p	گرمای ویژه
-	-	0.001412	-	-	(Pa.s)	ν	ویسکوزیته

تابستان است و دمای اولیه سیال ورودی به خاک ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. سرعت سیال در ورود و خروج لوله ۰/۲ متر بر ثانیه است. گام اولیه (Initial step) برابر ۰/۰۰۱۵ ثانیه است و ماکزیمم گام ۶۰۰s در نظر گرفته شده است. همچنین،

شرایط مرزی و شرایط اولیه

دمای اولیه خاک و مواد پرکننده ۱۸/۲ درجه سانتی گراد است که حدود دمای خاک در تهران در نظر گرفته شده است. دمای اولیه سطح زمین ۳۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است که دمای شبیه سازی سطح خاک در

pipe flow استفاده شده و برای قسمت جامد همانند خاک، مواد پرکننده چاه و پره از ماژول transfer in solid استفاده شده است. در جدول ۴ شرایط مرزی و اولیه به صورت خلاصه نوشته شده است.

تلورانس نسبی برابر ۰/۰۰۱ است. در ضمن از حل‌گر Multifrontal Massively Parallel sparse direct Solver (MUMPS) در نرم‌افزار کامسول برای این مدل استفاده شده و برای سیال داخل لوله از ماژول nonisothermal

جدول ۴. شرایط مرزی و اولیه مدل شبیه‌سازی شده

تعاریف	اندازه	پارامتر
دمای اولیه خاک و چاه	18.2°C.	$T_0 = T(0, r, \theta, z)$
دمای سطحی خاک	30°C	$T_s = T(t, r, \theta, 0)$
دمای اولیه سیال	35°C	T_i
سرعت سیال	0.2 m/s	u_f
مدت زمان شبیه‌سازی	48 ساعت	t_{test}

برای تأثیر سرعت با تغییر در پیچ لوله‌ها، تغییر هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه و تأثیر میله‌های آلومینیومی که داخل زمین فرو رفته بود به منظور افزایش در وسع تر شدن میزان تبادل حرارت لوله با خاک و در نهایت افزایش بهره‌وری سیستم بررسی شد.

بررسی و تأثیر اندازه‌های مختلف مدل عمق خاک

برای تعیین عمق خاک در نظر گرفته شده، دو عمق خاک ۱۲ و ۱۵ متری برای چاه ۱۰ متری در نظر گرفته شد. دمای خروجی در حالت ۱۲ و ۱۵ متری با هم بعد از ۴۸ ساعت مقایسه شد و هیچ اختلافی با هم نداشتند. البته نمودار دما-زمان انتهای خاک را در حالت عمق ۱۲ متری خاک در شکل ۳ نشان داده شده است و نشان می‌دهد تا قبل از ۵۰ ساعت هیچ تأثیری روی انتهای خاک گذاشته نمی‌شود. همچنین، بعد از ۵۰ ساعت هم تأثیر بسیار کمی گذاشته می‌شود که دمای انتهای خاک در حالت ۱۲ متری تا ۵۰ ساعت تغییر نکرده و از ۵۰ تا ۲۴۰ ساعت فقط ۰/۳°C تغییر می‌کند و این نشان می‌دهد ارتفاع مناسبی برای خاک در این تحقیق ۱۲ متر است. شکل ۳ با افزایش رسانندگی گرمایی چاه و خاک به مقدار ۲ است و برای ۵ نقطه زیر لوله با عمق‌های از ۱۰- تا ۱۲- نشان داده شده است. در اینجا مشاهده می‌شود هر چه به طرف پایین برویم، از میزان اثرگذاری لوله روی خاک کم می‌شود. هر چند منطقی‌تر است که ارتفاع را بیشتر کنیم و همچنین، شاید دمای لوله روی ته خاک تأثیرگذار باشد، اما برای ۴۸ ساعت روی دمای خروجی سیال که هدف مقاله است، اصلاً تأثیرگذار نیست.

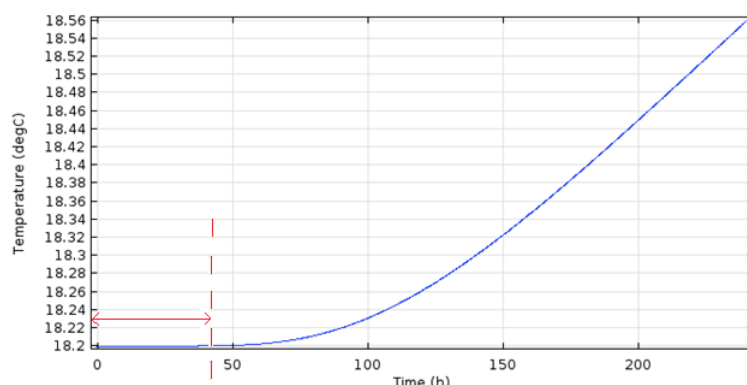
مش

برای مش زنی مدل ایجاد شده از نرم‌افزار کامسول استفاده شده است. مش‌های ایجاد شده به صورت که مش در خط لوله به صورت بسیار ریز (Extra fine) با حداقل سایز المان ۵ میلی‌متر همچنین در نقاط حساس از جمله ورودی و خروجی سیال مش‌های بسیار ریز (Extremely fine) استفاده شده است. برای سایر نواحی از مش چهارضلعی آزاد (Free tetrahedral) با مش ریز به کار برده شده است. حداقل سایز المان برای پره، خاک و چاه ۸ میلی‌متر، ۲ سانتی‌متر و ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای حالت بدون پره که اندازه گام ۰/۳۳ متر و عمق چاه ۱۰ متر است، از ۲۴۱۶۱۱۶ گره (node) استفاده شده است.

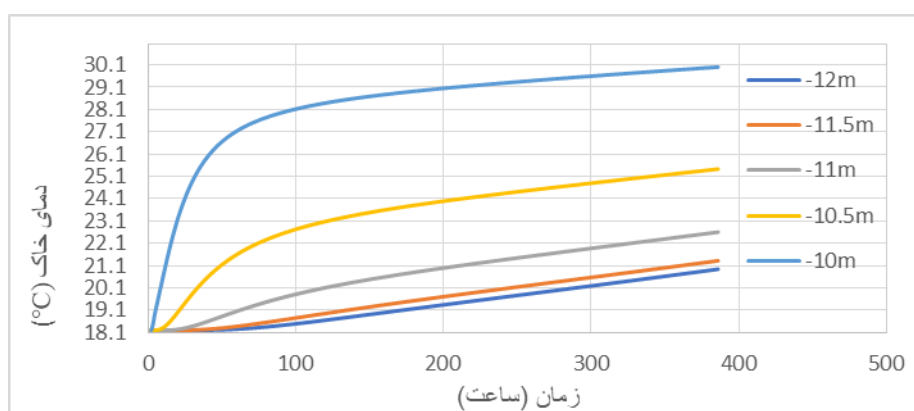
۳. بحث و نتیجه‌گیری

به صورت کلی، قبل از اعمال تغییرات روی مدل اصلی و بررسی و مقایسه نتایج، مدل به گونه‌ای آنالیز شده که با افزایش فاصله لبه‌های خاک با لوله باعث شده که دمای روی زمین و اطراف خاک کمترین تأثیر روی مبدل حرارتی داشته باشد تا بتوان به صورت دقیقی مدل‌ها را با هم مقایسه کنیم. در نتیجه، فاصله اولین خط لوله تا خاک را ۲ متر و عمق دفن لوله را ۱۰ متر در نظر گرفتیم. همچنین، میزان زمان کارکرد لوله ۴۸ ساعت در نظر گرفته شده است. یعنی ۲ روز بدون وقفه است. ولی در بعضی از محاسبات به منظور دید بهتر، مدت زمان را به ۳۰۰ ساعت افزایش دادیم که اعمال تغییرات در سیستم در طولانی مدت و تأثیر آن روی بازده سیستم و خاک را بهتر مشاهده کنیم.

سعیدی و آغاز: مدل سازی عددی برای تحلیل پارامترهای گوناگون مبدل حرارتی زمینی به منظور ...



شکل ۳. دمای انتهای خاک در عمق ۱۲ متری بعد از ۲۴۰ ساعت



شکل ۴. دمای خاک زیر لوله در ۵ عمق مختلف

دمای ایجاد شده در بهترین حالت که مربوط به حالت ۵ است $0.84/^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد است، ۳۱ درصد میزان انتقال حرارت را بهبود می بخشد. در شکل ۵ میزان بهبود انتقال حرارت در پره های مختلف نشان داده شده است. همچنین، سرعت انتقال حرارت در خاک در راستای میله ها افزایش چشمگیری می یابد، به گونه ای که در شکل ۶ مشاهده می شود که حالت پره دار را نشان می دهد. در عمق ۵ متری زمین و فاصله ۱ متری از مرکز چاه دمای خاک در حالت میله دار بودن و بعد از ۴۸ ساعت 23.08°C است در حالی که بدون میله همان نقطه دمای 21.28°C درجه را دارد.

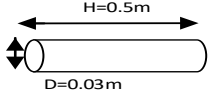
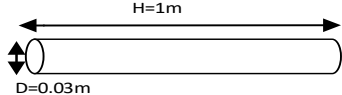
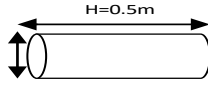
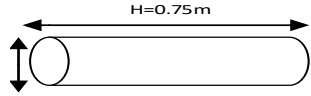
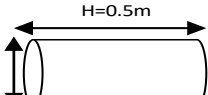
همچنین دمای $21.28/^\circ\text{C}$ در حالت بدون میله که در ۴۸ ساعت به آن دما رسیده است، در حالت میله دار بودن در این نقطه در زمان ۱۸.۸ ساعت به این دما رسیده است که علاوه بر افزایش وسعت انتقال حرارت، نشان از افزایش سرعت در انتقال حرارت در حدود $2/5$ برابر می دهد.

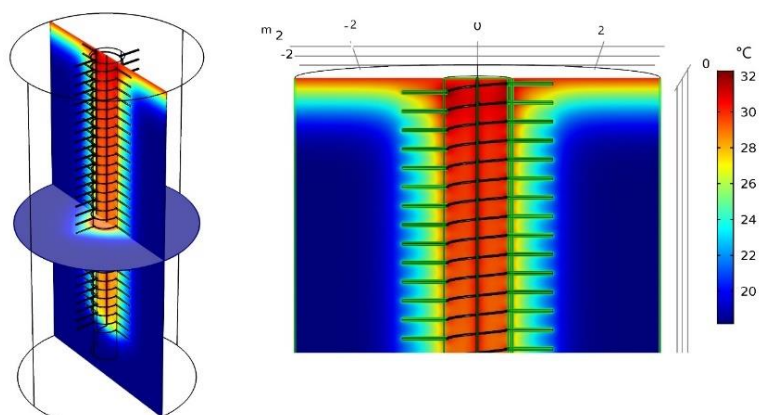
تأثیر میله روی خاک و انتقال حرارت آن

با توجه به اینکه قطر چاه ۱ متر است و نسبت به چاه های به کار رفته در سیستم های زمین گرمایی نسبتاً بزرگ تر است، پس می توانیم لوله را با میله های داخل زمین به صورت دستی قرار داده خواهد شد که این خود ۲ مزیت عمده دارد می توان به وسیله این میله ها که داخل زمین فرو می کنیم، لوله را محکم نگه دارد و جای فونداسیون استفاده شود و همچنین، اگر میله را آلومینیوم و یا مس و یا فلزی با رسانندگی حرارتی بالا انتخاب شود. می توان حرارت منتقل شده به خاک یا گرفته شده از خاک را با درگیر شدن حجم بیشتر خاک افزایش داد.

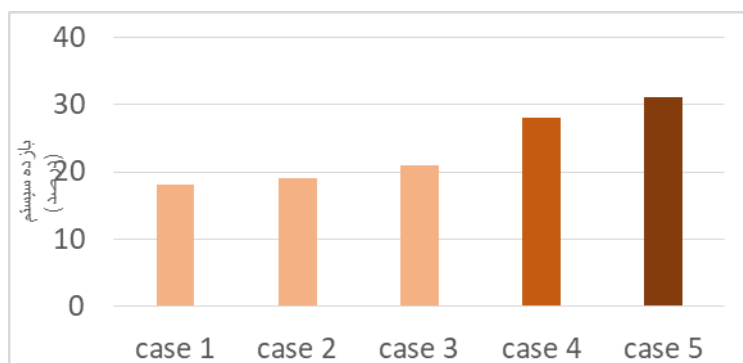
با توجه به شکل ۲ هر حلقه با ۴ میله در ارتباط است که میله ها نسبت به هم ۹۰ درجه فاصله دارند که در مجموع، ۱۲۰ میله وارد زمین شده است. ۵ نوع میله با طول و قطرهای مختلف بررسی شده که جنس میله ها از آلومینیوم است که در جدول ۵ مشخصات میله ها و تأثیر آن روی دمای خروجی نشان داده شده است. با اختلاف

جدول ۵. مشخصات میله‌ها و تأثیر آن روی دمای خروجی

حالت	شکل	دمای خروجی در حضور پره °C	اختلاف دمای پره‌دار و بدون پره °C
1		31.78	0.49
2		31.742	0.528
3		31.70	0.57
4		31.488	0.782
5		31.429	0.841



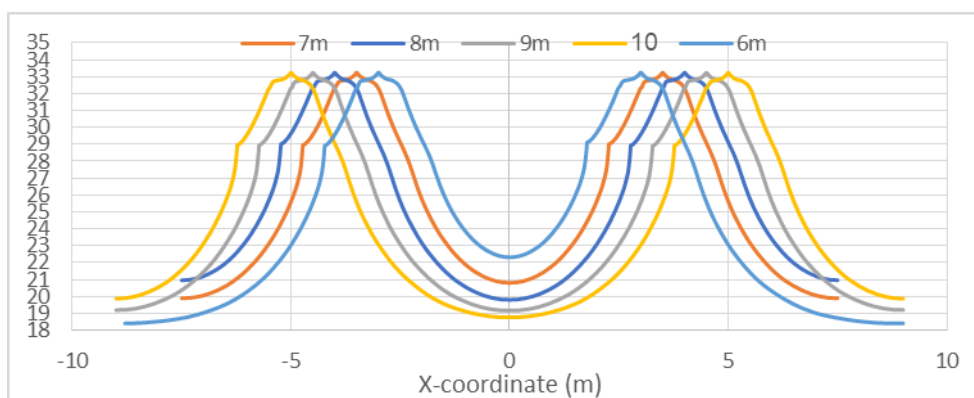
شکل ۵. برش مقطعی از وسط مدل در حالت پره‌دار بعد از ۴۸ ساعت



شکل ۶. میزان بازده سیستم با استفاده از پره

می یابد، ولی این افزایش خاک در دمای خروجی سیال تأثیر نمی گذارد. به نظر می رسد فاصله ۶ - ۷ متر برای یک ماه فعالیت هیت پمپ زمین گرمایی مناسب است، اما ریکاوری حرارتی خاک هم اهمیت ویژه ای دارد. اگر سیستم به مدت ۳ ماه بدون توقف کار کند، باید فاصله دو مبدل بیشتر شود. هر چند پره کار گذاشته شده ریکاوری خاک را نیز سریع تر می کند. اما به طور کلی هیچ وقت سیستم مدام کار نمی کند و بازیابی حرارتی زمین به طور متفاوت اتفاق می افتد.

دو لوله را با فاصله های مختلف برای مدت ۷۲۰ ساعت (یک ماه) شبیه سازی کردیم. در شکل ۴-۱۲ فاصله center-to-center دو لوله ۷ متر است و نشان می دهد بعد از ۱ ماه تأثیر بسیار زیادی روی ناحیه وسط دو لوله نداشته، هر چند دمای این ناحیه بالا رفته است. در شکل ۷ توزیع دمای سیستم در عمق ۵ متری ($z=5$) بعد از ۷۲۰ ساعت برای ۵ حالت فاصله بین دو لوله بررسی شده است. مشاهده می شود که در مرکز سیستم ($x=0$) با کاهش فاصله مبدل ها دمای خاک افزایش



شکل ۷. توزیع دمای سیستم در عمق ۵ متری بعد از ۷۲۰ ساعت برای ۵ حالت فاصله بین دو لوله

۴. جمع بندی

در این مقاله از مدل یک بعدی- سه بعدی برای شبیه سازی مبدل زمین گرمایی به شکل مارپیچ با عمق کم (۱۰ متر) و قطر زیاد (۱ متر) در نرم افزار کامسول استفاده شده و مدل شبیه سازی شده است.

با تغییر در پارامترهای مختلف مانند تغییر در سرعت سیال داخل لوله، گام لوله، رسانندگی گرمایی در خاک و مواد پرکننده و اضافه کردن پره به داخل خاک اثرگذاری بهتری در بازده سیستم هیت پمپ زمین گرمایی بررسی شد؛ از جمله نتایج گرفته شده در این مقاله به شرح زیر است:

- مدل 1D-3D می تواند بهترین روش شبیه سازی در نرم افزار کامسول برای لوله های زمین گرمایی باشد، چراکه بسیار سرعت شبیه سازی را بیشتر می کند و دقت بسیار زیادی دارد.
- سرعت بهینه سیال در لوله های مارپیچ با تغییر در گام لوله تغییر می کند، به صورتی که محدوده پیشنهادی سرعت در گام ۰/۱ متر برابر است با ۰/۱۵ تا ۰/۲ متر بر ثانیه، برای گام ۰/۲ متر برابر

است با ۰/۲ تا ۰/۴ متر بر ثانیه و برای گام ۰/۳ متر برابر است با ۰/۶ تا ۰/۸ متر بر ثانیه.

- عمق چاه حفار شده یکی از فاکتورهای مهم اختلاف دما ورودی و خروجی سیال است؛ و از طول لوله داخل چاه اهمیت بیشتری دارد.
- کار گذاشتن ۱۲۰ پره آلومینیومی در حالت افقی در خاک و متصل به مبدل زمینی باعث بهبود در انتقال حرارت می شود؛ که با بررسی ۵ نوع میله توانستیم ۰/۸۴ درجه سانتی گراد افزایش در اختلاف دما ایجاد کنیم که به میزان ۳۱ درصد انتقال حرارت را بهبود می بخشد.

تا کنون فعالیت های تئوری و عملی در مورد استفاده از پره داخل مبدل زمین گرمایی انجام نشده و این اولین بار است که شبیه سازی برای مبدل انجام می شود. همچنین، تغییری اساسی در مدل مبدل های زمین گرمایی صورت گرفته، به صورتی که به جای استفاده از لوله ها در چاه های عمیق از لوله حلقوی در چاه کم عمق استفاده شده و برای اینکه بتوان چاه را دستی حفر کرد، قطر چاه یک متر در

نظر گرفته شده است. سپس داخل این خاک برای اولین بار از میله استفاده شده است تا وسعت انتقال حرارت خاک با مبدل را افزایش بدهد و به انتقال حرارت سرعت ببخشد. نوآوری دیگر این تحقیق پیشنهاد سرعت‌های مختلف در لوله مارپیچ با گام‌های مختلف است که برای اولین بار انجام شده است. همچنین، این تحقیق شبیه‌سازی یک مدل جدید بود که توانست بازده سیستم را بالا ببرد. این مدل باید به صورت عملی و آزمایشگاهی اجرا شود تا از لحاظ اقتصادی نیز بررسی شود.

منابع

- [1]. Aslani A, Hamlehdar M, Saeedi R. Robustness of Norway Economy and Energy Supply/Demand. *International Journal of Green Computing*. 2017 Jul;8(2):1–19.
- [2]. Hamledar M, Saeidi R, Aslani A. Analysis of the Robustness of Norway's Economy and Energy Supply/Demand Fluctuations. In: s, editor. *Economic Dynamics of Global Energy Geopolitics*. IGI Global; 2019.
- [3]. Hamledar M, Saeidi R, Aslani A. Analysis of the Robustness of Norway's Economy and Energy Supply/Demand Fluctuations. In 2019. p. 215–41.
- [4]. Izanloo M, Noorollahi Y, Aslani A. Future energy planning to maximize renewable energy share for the south Caspian Sea climate. *Renew Energy [Internet]*. 2021;175:660–75. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121006844>
- [5]. Yousefi H, Hafeznia H, Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a gis-based boolean-fuzzy logic model: A case study of Markazi Province, Iran. *Energies (Basel)*. 2018;11(7).
- [6]. Noorollahi Y, Mohammadzadeh Bina S, Yousefi H. Simulation of Power Production from Dry Geothermal Well Using Down-hole Heat Exchanger in Sabalan Field, Northwest Iran. *Natural Resources Research*. 2016;25(2):227–39.
- [7]. Zahedi R, Daneshgar S, Seraji MAN, Asemi H. Modeling and interpretation of geomagnetic data related to geothermal sources, Northwest of Delijan. *Renew Energy*. 2022 Aug;196:444–50.
- [8]. Qi Z, Gao Q, Liu Y, Gao Z, Bai L. Effect of the circulation flow velocity in ground heat exchangers on system operation. 2014;583:2457–60.
- [9]. Mohammadzadeh Bina S, Fujii H, Kosukegawa H, Farabi-Asl H. Evaluation of ground source heat pump system's enhancement by extracting groundwater and making artificial groundwater velocity. *Energy Convers Manag [Internet]*. 2020;223:113298. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420308372>
- [10]. Kong X ri, Deng Y, Li L, Gong W shen, Cao S jie. Experimental and numerical study on the thermal performance of ground source heat pump with a set of designed buried pipes. *Appl Therm Eng*. 2017;114:110–7.
- [11]. Congedo PM, Colangelo G, Starace G. CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Appl Therm Eng*. 2012;33–34:24–32.
- [12]. Cao S jie, Kong X ri, Deng Y, Zhang W, Yang L, Ye Z ping. Investigation on thermal performance of steel heat exchanger for ground source heat pump systems using full-scale experiments and numerical simulations. *Appl Therm Eng*. 2017;115:91–8.
- [13]. Chong CSA, Gan G, Verhoef A, Garcia RG, Vidale PL. Simulation of thermal performance of horizontal slinky-loop heat exchangers for ground source heat pumps. *Appl Energy*. 2013;104:603–10.
- [14]. Luo J, Zhao H, Gui S, Xiang W, Rohn J, Blum P. Thermo-economic analysis of four different types of ground heat exchangers in energy piles. *Appl Therm Eng*. 2016;108:11–9.
- [15]. Yang W, Lu P, Chen Y. Laboratory investigations of the thermal performance of an energy pile with spiral coil ground heat exchanger. *Energy Build*. 2016;128:491–502.
- [16]. Park S, Sung C, Jung K, Sohn B, Chauchois A, Choi H. Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe. *Appl Therm Eng*. 2015;90:1061–71.
- [17]. Park S, Lee D, Choi HJ, Jung K, Choi H. Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger). *Energy*. 2015;81:56–66.
- [18]. Yoon S, Lee SR, Go GH. Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers. *Energy Build*. 2015;105:100–5.
- [19]. Bassiouny R, Ali MRO, Hassan MK. An idea to enhance the thermal performance of

- HDPE pipes used for ground-source applications. *Appl Therm Eng.* 2016;109:15–21.
- [20]. Faizal M, Bouazza A, Singh RM. Heat transfer enhancement of geothermal energy piles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 2016;57:16–33. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.065>
- [21]. Ghasemi-fare O, Basu P. A practical heat transfer model for geothermal piles. *Energy Build* [Internet]. 2013;66:470–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.048>
- [22]. Saeidi R, Noorollahi Y, Esfahanian V. Numerical simulation of a novel spiral type ground heat exchanger for enhancing heat transfer performance of geothermal heat pump. *Energy Convers Manag.* 2018 Jul 15;168:296–307.
- [23]. Zahedi R, Babaei Rad A. Numerical and experimental simulation of gas-liquid two-phase flow in 90-degree elbow. *Alexandria Engineering Journal.* 2022 Mar;61(3):2536–50.