



Numerical modeling and analysis of the effect of surface groundwater flow and natural convection on the heat exchange of energy pile

Seyyed Makan Fattahian¹, Mohammad Hossein Sobhdam², Mohammad Mehdi Ahmadi² *

¹ Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The use of renewable energy, particularly shallow geothermal energy, for heating and cooling various spaces during both hot and cold seasons has received considerable attention. Therefore, investigating the natural factors affecting the efficiency of this system, especially the groundwater flow, is of particular importance. The presence of groundwater flow significantly increases the efficiency of shallow geothermal systems. It has been found that the existence of groundwater flow significantly improves the efficiency of the shallow geothermal energy system. However, the assessment of system efficiency under the influence of groundwater flow is often subjected to error and has been inadequately addressed in the literature. In this study, an energy pile was modeled for a period of 90 days using COMSOL Multiphysics software and the finite element method, taking into account surface groundwater flow. The modeling assumes constant soil and inlet fluid temperature. The analysis was carried out for heating and cooling scenarios with various U-shaped pipe existence of groundwater flow. The results indicate that the presence of surface groundwater flow due to natural convection, independent of soil temperature, leads to a significant reduction in system performance.

Review History:

Received: Feb. 22, 2024

Revised: May, 14, 2024

Accepted: May, 24, 2024

Available Online: Jun. 04, 2024

Keywords:

Geothermal Energy

Energy Pile

Groundwater Flow

Numerical Modeling

Natural Convection

1- Introduction

Shallow geothermal energy has emerged as a significant and rapidly growing source of renewable energy worldwide. Between the years of 2005 and 2010, the annual growth rate of this sustainable energy source was 16.6% [1]. The most prominent energy geostructures are geothermal boreholes, energy walls, energy tunnels, piles, and groups of energy piles [2]. Among the mentioned cases, energy piles are more popular due to their ability to perform both structural and energy supply functions simultaneously. An investigation of the heat transfer process in energy piles involves various components, including heat transfer within the fluid, pipe, pile, soil, and heat exchange in their interactions. In addition, heat transfer by water between soil pores and the phenomenon of water seepage in the soil must be considered, taking into account the geotechnical characteristics and hydrology of the soil domain. These factors play a significant role in heat transfer in the soil environment [3]. The phenomenon of water flow in soil can be classified into three categories: natural convection, forced convection, and mixed convection. Natural convection is a consequence of temperature fluctuations within the soil domain that affect the density of the fluid present in the soil. Forced convection occurs due to differences in total head between different regions of the soil. In contrast, mixed convection is defined as the simultaneous occurrence of both

convection models [4].

The effect of groundwater flow on the behavior of energy piles is still under investigation by researchers, to provide more detailed analyses of this issue. When there is groundwater flowing near the surface of the earth, it is crucial to consider the temperature of the surface of the earth and natural convection. However, in most previous studies, one or both factors have not been considered. The objective of this research is to examine the impact of surface groundwater flow on the behavior output power of energy piles while considering the effects of natural convection and the temperature of the ground surface. This is achieved by using the finite element numerical method by COMSOL software.

2- Assumptions and Numerical Model

In the model, the dimensions for the length, width, and height were considered as $50D_{ep} \times \sqrt{L_{ep}} \times \sqrt{L_{ep}}$, where D_{ep} is the diameter of the pile and L_{ep} is the length of the pile [5]. The model investigates the effect of surface groundwater flow for heating and cooling with a U-shaped pipe. The basic assumptions of this research are as follows:

- The soil is assumed to be completely saturated, and the water inside the soil pores is incompressible.
- The temperature of the soil and water inside the soil is assumed to be equal.

*Corresponding author's email: mmahmadi@sharif.edu



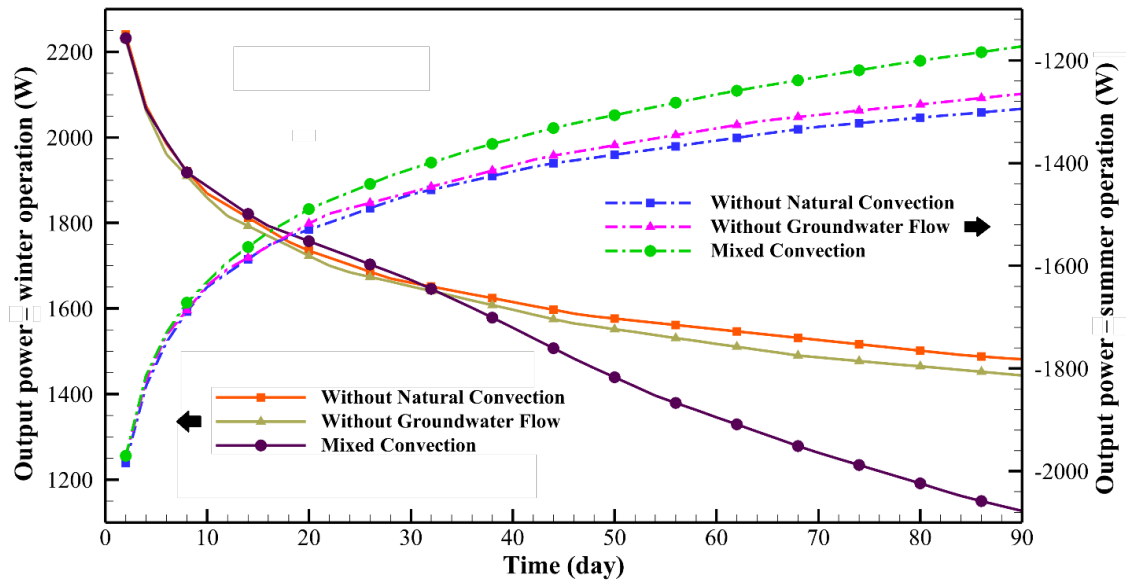


Fig. 1. Output power of energy pile in different scenarios for winter and summer operation

- The environment is assumed to be completely homogeneous, and the thermal and hydraulic properties are assumed to be unchangeable (isotropic).
- The Brinkman equation is valid for both natural and forced convection modes.

The concrete cover on the pipe is 75 mm, and the distance from the lowest part of the pipe to the end of the pile is 150 mm. In the modeling of energy piles, the tube inside the pile is typically considered insulated up to a depth of 4 meters from the ground surface. This approach is employed to minimize the impact of temperature changes on the ground surface on the system. To model the surface groundwater flow, two layers of soil have been utilized: the upper layer of sand (16m thickness) and the lower layer of clay. The velocity of groundwater flow is equal to 5.15×10^{-7} m/s, and its other characteristics change non-linearly in response to temperature, as calculated by COMSOL software.

To determine the boundary conditions, the boundary condition of constant temperature has been employed for the sides and bottom surface of the model and the fluid inlet temperature has been held constant. For the winter season, the temperature of the ground surface and the inlet water flow were assumed to be -1 and 1 °C, respectively. For the summer mode, the temperature of the ground surface and the inlet water flow were assumed to be 36 and 31 degrees Celsius, respectively. Furthermore, the temperature of the ground remained constant at 17 degrees Celsius in both scenarios. The thermal performance of the system has been modeled in each one of the heating and cooling modes for a period of 90 days.

3- Results and discussion

The objective of this study was to compare the output power in three scenarios according to the thermo-hydraulic characteristics of the soil. In the initial scenario, there is no groundwater flow (forced convection) or natural convection in the model. In the second case, there is a groundwater flow, but the effect of natural convection flow is disregarded. In the third case, the simultaneous effect of groundwater flow and natural convection is considered. A model was constructed to investigate the most effective heating and cooling strategies for a building. Figure 1 presents the output power in watts (W) for an energy pile in the cold months of the year for each of these three modes.

As illustrated in Figure 1, during winter operation, when groundwater flow is considered to be without natural convection, as anticipated, the output power is enhanced in comparison to the scenario where there is no groundwater flow. The observed improvement in performance and increase in heat exchange rate reached approximately 2.6% on the 90th day. However, when the natural convection flow is considered, the output power is found to decrease significantly from the 30th day. The reduction in output power is observed to reach more than 27% on the 90th day for the U-shaped pipe. This phenomenon can be attributed to the continuous natural convection caused by the temperature difference between the ground surface and the soil domain, which completely alters the direction of the flow within the soil domain. This results in the transfer of ground surface temperature to the interior of the soil, which subsequently leads to a decrease in soil temperature. It is noteworthy that

this phenomenon occurs exclusively in the upper sand layer, with the lower clay layer remaining largely unaffected due to its low permeability. It can be demonstrated that a reduction in the temperature of the existing soil domain will result in a reduction in the output power of the energy pile.

This also applies to the 90 days of the summer season. The negative effect of the presence of surface seepage in the hot seasons of the year is also significant. Not considering the natural convection flow can cause a significant impact on the thermal performance of the energy pile. Figure 1 shows the output power of an energy pile over time with summer performance. As illustrated in Figure 1, the presence of groundwater flow without natural convection enhances the output power of the energy pile in a manner analogous to the winter performance. However, when the effect of natural convection flow is taken into account, the output power declines once more. On the 90th day, the output power drop reaches 10% in comparison to the state without groundwater flow.

4- Conclusion

In this research, numerical modeling and COMSOL software were employed to investigate the effect of natural convection flow and surface seepage in a sand-clay double-layered soil, in different seasons and conditions, on a 28-meter-long energy pile, U-shaped piping, and over a period of 90 days. The constructed model was validated against previous studies and subsequently employed for analysis. The following paragraph presents the most significant findings of this research:

- At low groundwater flow velocity, the natural convection

flow induced by the ground surface temperature can influence the velocity and direction of groundwater flow. The impact of natural convection flow caused by the temperature of the ground surface can have a considerable effect on the thermal performance and output power of the energy pile.

- In cold seasons, the natural convection flow can reduce the output power of the energy pile by 27%. This reduction in output power is 10% in the hot seasons of the year.

References

- [1] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski, F. Haghghat, A review on energy piles design, sizing and modelling, *Energy*, 122 (2017) 390-407.
- [2] S.M. Fattahian, M.A.Kiani Fordoei, M. Oliaei, Numerical investigation of the factors affecting the output power from heat exchanger piles, *Civil Engineering Sharif*. (2021). (In Persian)
- [3] A.K. Sani, R.M. Singh, T. Amis, I. Cavarretta, A review on the performance of geothermal energy pile foundation, its design process and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106 (2019) 54-78.
- [4] O. Ghasemi-Fare, P. Basu, Influences of ground saturation and thermal boundary condition on energy harvesting using geothermal piles, *Energy and Buildings*. 165 (2018) 340–351.
- [5] Y. Lou, P. fei Fang, X. yu Xie, C.S.A. Chong, F. yuan Li, C. yang Liu, Z. jin Wang, D. yong Zhu, Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow, *Geomechanics for Energy and the Environment*. 28 (2021).



مدلسازی عددی و بررسی تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی و همرفت طبیعی بر توان خروجی شمع انرژی

سید ماکان فتاحیان^۱، محمدحسین صبحدم^۲، محمدمهدی احمدی^{۳*}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

کلمات کلیدی:

انرژی زمین گرمایی

جریان آب زیرزمینی

شمع انرژی

همرفت طبیعی

مدلسازی عددی

خلاصه: در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بخصوص انرژی زمین گرمایی کم عمق برای گرمایش و سرمایش مکان‌های مختلف در فصل‌های گرم و سرد سال بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. از این رو بررسی عوامل طبیعی تاثیرگذار بر کارایی این سیستم، به ویژه جریان آب زیرزمینی دارای اهمیت خاصی است به نحوی که مشخص شده‌است وجود جریان آب زیرزمینی به طور قابل توجهی باعث بهبود عملکرد سیستم انرژی زمین گرمایی کم عمق می‌شود. اما بررسی عملکرد این سیستم تحت تاثیر جریان آب زیرزمینی همواره با خطاهایی روبرو بوده است که به آن کمتر پرداخته شده‌است. در این پژوهش، یک شمع انرژی با در نظر گرفتن جریان آب زیرزمینی سطحی و اثر همرفت طبیعی توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics و روش عددی اجزا محدود، در شرایطی که دمای سطح زمین و سیال ورودی به لوله ثابت است، در یک بازه ۹۰ روزه و با لوله گذاری U شکل مدلسازی شده و مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که جریان آب زیرزمینی سطحی می‌تواند به علت اختلاف دمای قابل توجه بین سطح و عمق زمین باشد بطور کل تحت تاثیر جریان همرفت طبیعی قرار گیرد که باعث انتقال دمای سطح زمین به درون دامنه خاکی شود و این موضوع باعث کاهش قابل توجه توان خروجی سیستم در فصول سرد و گرم سال به ترتیب به میزان تقریبی ۲۷ و ۱۰ درصد می‌گردد. همچنین نحوه تغییرات دما در داخل توده خاکی تحت تاثیر جریان همرفت طبیعی در فصل گرم به صورت یکنواخت در عمق و فصل‌های سرد بصورت نامنظم می‌باشد.

۱- مقدمه

قابل استفاده است. برای استخراج این انرژی از داخل زمین از مبدل‌ها^۱ و پمپ‌های^۲ زمین گرمایی استفاده می‌شود که به مجموع آن‌ها ژئوسازه‌های انرژی اطلاق می‌گردد. از جمله این ژئوسازه‌های انرژی می‌توان به چاه‌های زمین گرمایی، دیوار انرژی، تونل انرژی، شمع و گروه شمع‌های انرژی اشاره کرد [۳و۴]. در بین موارد ذکر شده، شمع‌های انرژی به علت داشتن قابلیت انجام همزمان عملکرد سازه‌ای و تامین انرژی محبوبیت بیشتری دارند [۲]. با این وجود استاندارد جامعی که بتواند تعاملات پیچیده بین رفتارهای حرارتی و مکانیکی شمع‌های انرژی را در نظر بگیرد، در حال حاضر در دسترس نیست، از این رو طراحی شمع‌های انرژی بیشتر بر اساس معادلات تجربی انجام می‌شود [۱۰].

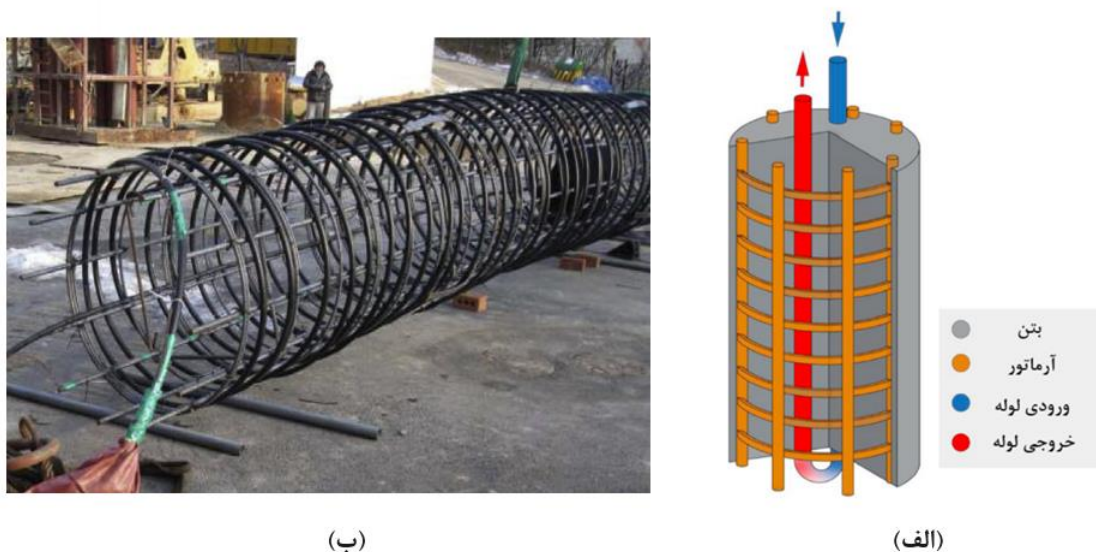
انرژی عنصری حیاتی در جوامع مدرن امروزی است. در دهه‌های گذشته، افزایش جمعیت و نیاز به تولید بیشتر برای تامین نیازهای مردم باعث افزایش مصرف انرژی در جهان و در نتیجه‌ی آن انتشار روزافزون گاز CO₂ در محیط پیرامون گشته است. از این رو در سالیان اخیر استفاده و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مورد توجه بوده است [۱]. انرژی زمین گرمایی کم عمق به یکی از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر مهم در سراسر دنیا تبدیل شده‌است. به طوری که این انرژی پایدار بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ رشد سالانه قابل توجه ۱۶/۶٪ را داشته است [۲]. یکی از علت‌های استقبال از این انرژی در سرتاسر جهان آن است که نه تنها استفاده از آن موجب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، بلکه برای گرمایش و سرمایش خانه‌ها و ساختمان‌ها نیز

در سال ۲۰۰۱ اولین پروژه شمع انرژی در ساختمان ۶ طبقه‌ی دانشکده کبک^۳ دانشگاه آکسفورد اجرا شد [۵]. از دیگر نمونه‌های ساخته شده آن

- 1 Ground Heat Exchanger (GHE)
- 2 Ground Source Heat Pump (GSHP)
- 3 Keble college

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu





شکل ۱. الف) شکل شماتیک پیکربندی شمع انرژی [۱۰] ب) نصب لوله پلی اتیلن بر روی قفسه آرماتور شمع [۳۷]

Fig. 1. a) Schematic of energy pile configuration [10] b) Installation of HDPE pipe on pile reinforcement [37]

بازدهی شمع انرژی، با فرضیات مختلف در ادبیات فنی موجود است که در جدول ۱ به برخی از آن‌ها اشاره شده است. به عنوان مثال جهت مدلسازی یک شمع انرژی به روش تحلیلی، در ابتدا از روشی با نام خط منبع^۳ استفاده می‌شد که در آن لوله مبدل حرارتی به عنوان یک منبع حرارت خطی با نرخ خروجی حرارت ثابت در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. سپس روش خط منبع محدود^۴ مطرح شد که طول مدل حرارتی را ثابت در نظر می‌گیرد [۱۲]. در ادامه برای مدلسازی جریان آب زیرزمینی در یک زمین همگن و با کمک تابع گرین^۵، مدل تحلیلی منبع خط محدود متحرک^۶ ابداع گردید [۱۳]. از طرف دیگر برای بدست آوردن خصوصیات حرارتی زمین از روش تجربی صحرائی^۷ آزمون پاسخ حرارتی^۷ استفاده می‌شود.

بررسی فرایند انتقال حرارت در شمع‌های انرژی شامل بخش‌های مختلفی از جمله انتقال حرارت در سیال داخل لوله، تبادل حرارت بین شمع و لوله، خاک و شمع و انتقال حرارت داخل خاک می‌باشد. علاوه بر این انتقال حرارت توسط آب موجود بین منافذ خاک و پدیده تراوش آب در خاک با در

می‌توان به ترمینال E فرودگاه زوریخ [۶] و دانشگاه پلی تکنیک فدرال لوزان سوییس [۷] اشاره کرد. مطابق شکل ۱ اجزای یک شمع انرژی شامل: شمع بتنی، شبکه آرماتور و لوله‌های مبادله گر حرارتی می‌باشد. آرماتور شمع در کنار نقش سازه‌ای، جهت ثابت نگه داشتن لوله‌های مبادله گر حرارتی در حین بتن ریزی نیز استفاده می‌گردد [۸]. سیستم‌های زمین گرمایی، به دلیل ثابت بودن دمای زمین در ماه‌های مختلف، دارای ضریب عملکرد^۱ ۴ تا ۵ می‌باشند که از ضریب عملکرد سیستم‌های پمپ حرارتی منبع هوا^۲ بالاتر است [۹و۵]. لازم به ذکر است که بیشترین هزینه برای ساخت و اجرای شمع‌های انرژی مربوط به حفاری زمین می‌باشد [۵]. در فرودگاه زوریخ مشاهده شد که هزینه تمام شده برای هر کیلووات ساعت انرژی استخراج شده از سیستم زمین گرمایی ۶ سنت می‌باشد در حالی که سایر سیستم‌های گرمایشی-سرمایشی معمول بطور میانگین ۸ cents/kWh هزینه دارند که در نتیجه این موضوع بازگشت سرمایه اولیه پس از ۸ رخ داد [۶]. با این وجود در ایران به علت پایین بودن قیمت سوخت‌های فسیلی و عدم شناخت کافی نسبت به این انرژی پاک و تجدید پذیر، چندان مورد استقبال قرار نگرفته است [۱۰].

مطالعات تجربی، آزمایشگاهی و عددی مختلفی برای بررسی عملکرد و

3 The Line Source (LS)
4 The Finite Line Source (FLS)
5 Green's Function
6 Moving Finite Line Source (MFLS)
7 Thermal Response Test (TRT)

1 The Coefficient of Performance (COP)
2 Air Source Heat Pump systems (ASHPs)

جدول ۱. برخی از مطالعات اخیر انجام شده مرتبط با تاثیر جریان زیرزمینی بر عملکرد ژئوسازه‌های انرژی

Table 1. Some recent studies about the effect of groundwater flow on the performance of energy geostructures

نام محقق	سال	روش تحقیق	موضوع تحقیق
گشتی [۲۶]	۲۰۱۵	مدلسازی عددی	بررسی تاثیر جریان همرفت اجباری بر توان خروجی شمع انرژی در تابستان و زمستان
ژانگ [۲۱]	۲۰۱۷	مدل تحلیلی	بررسی تراوش دو بعدی و اثر جهت‌گیری و سرعت جریان زیرزمینی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی
یو [۲۳]	۲۰۱۷	آزمایشگاهی	بررسی اثر جریان آب زیرزمینی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی
لو [۲۲]	۲۰۱۸	تجربی صحرائی	بررسی اثر تراز آب زیرزمینی بر نرخ تبادل حرارت مبدل حرارتی گمانه‌ای و آزمایش TRT در خاک لسی
تانگ [۲۹]	۲۰۱۹	مدلسازی عددی	بررسی اثر عوامل مختلف تاثیرگذار بر عملکرد مبدل حرارتی گمانه‌ای کم عمق
سیجارتو [۳۱]	۲۰۱۹	مدلسازی عددی	بررسی اثر برهم کنش جریان همرفت طبیعی و اجباری بر توزیع حرارتی بر حوضه آب زیرزمینی
لی [۲۷]	۲۰۲۰	آزمایشگاهی	بررسی نحوه توزیع بار حرارتی شمع انرژی در اثر تراوش در خاک ماسه‌ای و رسی
میرتمیزدوست [۲۰]	۲۰۲۰	مدلسازی عددی	بررسی حرکت جرم و حرارت در محیط متخلخل شکل‌پذیر با استفاده از مدل حرارتی-هیدرولیکی-مکانیکی
ژو [۲۴]	۲۰۲۱	مدل تحلیلی	بررسی اثرات جریان عمودی آب و همرفت سطحی بر عملکرد مبدل حرارتی گمانه‌ای
دین [۲۸]	۲۰۲۱	مدلسازی عددی	بررسی اثر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی بر عملکرد مبدل حرارتی افقی در عمق کم زمین
مهرآیین [۱۹]	۲۰۲۲	مدلسازی عددی	بررسی اثر جریان همرفت طبیعی بر توزیع حرارت در اطراف شمع انرژی در سرعت‌های کم همرفت اجباری
ژونگ [۳۰]	۲۰۲۳	مدلسازی عددی	بررسی عملکرد حرارتی دیوار انرژی و اثر تراوش و همرفت طبیعی بر مشخصات حرارتی-هیدرولیکی خاک
نجفیان [۳۲]	۲۰۲۴	مدلسازی عددی	بررسی اثر همرفت طبیعی بر تبادل حرارت در خاک‌های اشباع تحت جریان زیرزمینی محصور نشده
لقوامسه [۳۳]	۲۰۲۴	مدلسازی عددی	بررسی اثر لایه‌بندی خاک بر عملکرد حرارتی شمع انرژی با سرعت و عمق‌های مختلف جریان آب زیرزمینی

استفاده از روش‌های عددی مختلفی نیز برای بهبود و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد آزمون پاسخ حرارتی پیشنهاد شده‌است اما آن‌ها نیز در سرعت‌های بالای جریان آب زیرزمینی خطا دارند [۱۷]. همچنین پیشرفت‌های نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی خواص حرارتی و هیدرولیکی خاک با بهره‌گیری از استنباط بی‌زی^۱ و روش‌های محاسباتی کارآمد انجام شده‌است. اما با این وجود ضروری است تحقیقات بیشتر برای کاهش خطاها انجام شود [۱۸]. از این رو بررسی جریان آب زیرزمینی در تعامل با شمع و دیگر سازه‌های زمین گرمایی بسیار مورد توجه محققان می‌باشد.

تراوش در خاک به سه صورت جریان همرفت طبیعی^۲، همرفت اجباری^۳ و همرفت ترکیبی^۴ رخ می‌دهد. جریان همرفت طبیعی به علت تغییر دما در

نظر گرفتن خصوصیات ژئوتکنیکی و هیدرولوژی دامنه خاکی باید مورد توجه قرار گیرند زیرا نقش بسزایی در انتقال حرارت در محیط‌های خاکی دارند [۱۴]. در نظر نگرفتن تاثیرات جریان آب زیرزمینی در طراحی شمع‌های زمین گرمایی می‌تواند باعث خطاهای قابل توجه‌ای گردد به همین دلیل در طراحی یک پمپ حرارتی زمین گرمایی باید نرخ تغییرات سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته شود [۱۵]. به عنوان مثال، در یک کار تجربی در یک ساختمان ۳ طبقه در انگلستان که برای گرمایش و سرمایش از شمع انرژی استفاده شده بود، مشاهده شد که در طول فصل تابستان دمای سیال خروجی از لوله به طور قابل توجه‌ای از دمای پیش‌بینی شده کمتر است که علت اصلی آن عدم توجه به جریان آب زیرزمینی داخل خاک بوده است [۱۶]. از دیگر مواردی که وجود جریان آب زیرزمینی منجر به ایجاد خطا در مدل‌سازی می‌شود، آزمون پاسخ حرارتی است به نحوی که با آزمون‌های معمول نمی‌توان نتایج دقیقی را برای خصوصیات حرارتی خاک محاسبه کرد.

- 1 Bayesian Inference
- 2 Natural Convection
- 3 Forced Convection
- 4 Mixed Convection

داشت را طراحی کردند و نشان دادند که جریان آب زیرزمینی بار حرارتی را در داخل زمین توزیع می‌کند و بازیابی حرارتی بهتری را در زمین ایجاد می‌کند. تانگ و نوآموز^۷ [۲۹] در مطالعه عددی خود تأثیر عوامل مختلف را بر عملکرد مبدل‌های حرارتی کم عمق ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که در سرعت بالای جریان آب زیرزمینی، ضریب عملکرد^۸ مبدل‌های حرارتی گمانه افزایش می‌یابد. ترکیب جریان همرفت اجباری و طبیعی مسئله مورد مطالعه سیجارتو و همکاران^۹ [۳۱] بود. آن‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف مانند اختلاف دما بین کف و سطح مدل، شیب سطح آب، عمق مدل و ضریب ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی، اثر برهم‌کنش جریان آب همرفت طبیعی و اجباری را بر توزیع حرارت در حوضه‌های آب زیرزمینی مصنوعی توضیح دادند. همچنین مهرآیین و همکاران [۱۹] با مدل کردن یک منبع حرارتی عمودی در داخل خاک بیان کردند که جریان همرفت طبیعی در سرعت‌های پایین جریان همرفت اجباری، بر توزیع حرارت در اطراف مبدل حرارتی بسیار تأثیرگذار است و باعث کاهش دمای خاک در نزدیکی منبع گرما می‌شود.

نجفیان و همکاران^{۱۰} [۳۲] تأثیر آب‌های زیرزمینی محصور نشده^{۱۱} در هندسه شیب‌دار را بررسی کردند و نشان دادند که همرفت طبیعی در صورت وجود منبع حرارتی می‌تواند باعث افزایش دمای سطح زمین شود، که در شرایط محصور^{۱۲} بارزتر است. لقواسمه و همکاران^{۱۳} [۳۳] استدلال یافتند که حتی اگر بخش کوچکی از یک شمع انرژی در معرض جریان آب زیرزمینی قرار گیرد، تأثیر مثبت آن بر ضریب عملکرد شمع انرژی قابل توجه است. همچنین افزایش طول شمع غوطه‌ور باعث می‌شود که این ضریب عملکرد به طور قابل توجهی بهبود یابد. شایان ذکر است که نوسانات دما در دوره بهره‌برداری از شمع‌های انرژی می‌تواند رفتارهای مکانیکی جدیدی را در سطح مشترک بین شمع و خاک ایجاد کند و بر مقاومت نوک این شمع‌ها تأثیر بگذارد و موجب کاهش ظرفیت باربری گردد. این پدیده در گذشته و حال به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴ و ۳۵]. بر اساس این یافته‌ها، لو و همکاران^{۱۴} [۳۶] توصیه کردند که جریان آب زیرزمینی هنگام طراحی شمع‌های انرژی به دلیل نگرانی‌های ایمنی در نظر گرفته نشود. دلیل این موضوع آن است که جریان آب زیرزمینی به علت تخلیه حرارتی اطراف

محیط خاکی و در نتیجه آن تغییر چگالی سیال درون خاک ایجاد می‌شود. جریان همرفت اجباری به علت تفاوت در هد کل بین نقاط مختلف زمین اتفاق می‌افتد و همرفت ترکیبی به رخ دادن همزمان هر دو مدل همرفت اطلاق می‌گردد [۱۹]. میرتمیزدوست و همکاران [۲۰] مطالعه ای را در مورد تأثیر جریان همرفت در خاک انجام دادند و رابطه‌ای را برای تعیین کمیت اثرات آن پیشنهاد کردند. همچنین اثرات جریان آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به جهت، تراز ارتفاعی و سرعت آن مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال ژانگ و همکاران^۱ [۲۱] در یک مدل تحلیلی به کمک تابع گرین با مطالعه تراوش یک بعدی و دو بعدی اثر جهت گیری و سرعت آب زیرزمینی بر پاسخ دمایی شمع انرژی را بررسی کردند و اثر مثبت تراوش بر عملکرد حرارتی شمع انرژی را گزارش دادند. لو و همکاران^۲ [۲۲] با کمک آزمایش TRT نشان دادند که بالاتر بودن سطح تراز آب زیرزمینی موجب بهبود عملکرد تبادل حرارتی خاک می‌شود در مطالعه آن‌ها نشان داده شد که هدایت حرارتی موثر زمین هنگامی که سطح آب زیرزمینی در عمق ۱۰ متری است، حدوداً ۲۷/۵٪ بیشتر از حالتی است که سطح آب زیرزمینی در عمق ۳۵ متر قرار دارد. در پژوهشی دیگر یو و همکاران^۳ [۲۳] در یک مطالعه عددی آزمایشگاهی بیان داشتند که افزایش سرعت جریان آب زیر زمینی می‌تواند تأثیر مثبت قابل توجهی بر مبدل حرارتی گمانه‌ای^۴ داشته باشد. ژو و همکاران^۵ [۲۴] در یک مطالعه تحلیلی با استفاده از تابع گرین، اثرات جریان عمودی آب و همرفت سطحی را بر رفتار مبدل حرارتی گمانه‌ای بررسی کردند و دریافتند که انرژی حرارتی به دلیل وجود جریان آب عمودی به منطقه‌ای عمیق‌تر از انتهای گمانه منتقل می‌شود. همچنین با کاهش طول گمانه و افزایش سرعت آب زیرزمینی، همرفت سطحی تعیین‌کننده‌تر می‌شود در یک مطالعه عددی سه بعدی با کمک نرم افزار COMSOL توسط گشتی و همکاران [۲۶]، با در نظر گرفتن اثر دمای سطح زمین مشخص شد که تأثیر مثبت جریان در طول زمستان بیشتر از تابستان است به طوری که توان خروجی در زمستان به میزان ۲۰٪ و در تابستان به میزان ۵٪ در مقایسه با شرایط نبود جریان آب زیر زمینی بهبود یافته است. لی و همکاران^۶ [۲۷] یک دستگاه آزمایشگاهی دولایه در مقیاس کوچک شامل ماسه و خاک رس که جریان آب زیرزمینی در قسمتی از خاک ماسه ای جریان

7 Tang & Nowamooz

8 Coefficient of Performance (COP)

9 Szijsártó

10 Najafian

11 Unconfined

12 Confined

13 Alqawasmeh

14 Lou

1 Zhang

2 Luo

3 You

4 Borehole Heat Exchanger

5 Zhou

6 Li

۲-۱-۱- مدلسازی انتقال حرارت در لوله و محیط متخلخل

معادله حرکت و انتقال حرارت در لوله‌های مبدل گرما با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال در گردش بر اساس قانون بقا انرژی و به صورت یک بعدی مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۳۹]:

$$\rho_f C_p A_p \frac{\partial T_{Bulk,f}}{\partial t} + \rho_f C_p A_p v_{t,f} \nabla(T_{Bulk,f}) = \nabla[A_p \lambda_f \nabla(T_{Bulk,f})] + q_p \quad (1)$$

در معادله ρ_f چگالی سیال داخل لوله (kg/m^3)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال (J/(kg.K))، A_p سطح مقطع لوله (m^2)، $T_{bulk,f}$ دمای توده سیال (K)، t زمان (s)، $v_{t,f}$ بردار سرعت مماس بر مسیر جریان (m/s)، λ_f رسانایی حرارتی سیال درون لوله (W/(m.K)) و q_p نشان دهنده شار حرارتی مبادله شده در واحد طول لوله (W/m) می‌باشند.

معادله انتقال حرارت برای محیط‌های متخلخل از ترکیب قانون انرژی‌های ظاهر شده در معادلات انتقال حرارت جامدات و سیالات مشتق شده است که مطابق رابطه (۲) به شرح زیر است [۴۰]:

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f v_f \nabla(T) - \nabla(\lambda_m \nabla T) = 0 \quad (2)$$

در معادله فوق T دمای محیط (K)، $(\rho C_p)_f$ ظرفیت گرمایی حجمی موثر آب زیر زمینی در فشار ثابت ($\text{J/(m}^3.\text{K)}$)، v_f سرعت جریان آب زیرزمینی (m/s)، $(\rho C_p)_m$ و λ_m نیز به ترتیب ظرفیت گرمایی حجمی موثر محیط متخلخل در فشار ثابت ($\text{J/(m}^3.\text{K)}$) و رسانایی حرارتی محیط متخلخل (W/(m.K)) هستند که مطابق رابطه (۳) و (۴) به روش زیر به دست می‌آیند [۴۱]:

$$(\rho C_p)_m = (\rho C_p)_f(n) + (\rho C_p)_s(1-n) \quad (3)$$

$$\lambda_m = \lambda_f(n) + \lambda_s(1-n) \quad (4)$$

شمع انرژی، می‌تواند باعث کاهش بارهای حرارتی-مکانیکی بر روی شمع انرژی شود و ظرفیت باربری آن‌ها را افزایش دهد [۳۶ و ۳۷].

همانطور که مشاهده شد بررسی تاثیر جریان آب زیرزمینی بر روی رفتار شمع‌های انرژی به علت نوظهور بودن آن همچنان مورد بحث و بررسی محققان می‌باشد تا بتوانند تحلیل‌های دقیق‌تری از این موضوع ارائه کنند. زمانی که جریان آب زیرزمینی در نزدیکی سطح زمین وجود دارد، در نظر گرفتن دمای سطح زمین و همرفت طبیعی بسیار حائز اهمیت می‌شود اما در اغلب مطالعات پیشین، یک یا هر دو مورد فوق در نظر گرفته نشده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی دقیق تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی بر رفتار و میزان انرژی استخراج شده از شمع انرژی، با در نظر گرفتن هر دو عامل تاثیرگذار همرفت طبیعی و دمای سطح زمین با کمک روش عددی اجزا محدود^۱ است. شایان ذکر است که این مورد در مناطق نزدیک به سواحل رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها مشاهده شده و کاربرد دارد. همچنین جهت مدلسازی حرکت جریان آب زیرزمینی از معادله برینکمن^۲ استفاده شده است. در این پژوهش با توجه به در نظر گرفتن همزمان اثر همرفت طبیعی و دمای سطح زمین، نتایج متفاوت از چیزی که از مطالعات پیشین انتظار می‌رفت حاصل شد. در ادامه پس از بیان تئوری و معادلات انتقال حرارت در یک سیستم شمع انرژی، به بحث و بررسی موضوع فوق پرداخته خواهد شد.

۲- مباحث نظری و مدلسازی

۲-۱- روابط حاکم بر مسئله

روابط حاکم در این بخش شامل روابط حرارتی-هیدرولیکی^۳ می‌باشد. جهت مدلسازی مسئله انتقال حرارت در نرم‌افزار، از فیزیک‌های انتقال حرارت در محیط متخلخل^۴ و جریان در لوله غیر هم‌دم^۵ استفاده شده است که معادلات آن‌ها بر اساس اصل بقای انرژی و اختلاف پتانسیل حرارتی می‌باشد. همچنین جهت مدلسازی جریان آب زیرزمینی، معادله برینکمن انتخاب شده است که این فیزیک بر اصل اختلاف پتانسیل هیدرولیکی در محیط متخلخل استوار است. در ادامه هر یک از این فیزیک‌های انتخابی شرح داده شده‌اند.

- 1 Finite Element Method
- 2 Brinkman Equation
- 3 Thermo-Hydraulic
- 4 Heat Transfer in Porous Media
- 5 Nonisothermal Pipe Flow

مختلفی مانند دسترسی آن در ایران، دقت نرم افزار، محیط کاربری مناسب، توانایی مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت و همچنین ترکیب این فیزیک‌ها با یکدیگر مدنظر قرار گرفت. در این پژوهش جهت انجام مدل‌سازی سه بعدی شمع انرژی به منظور تحلیل عملکرد حرارتی مدل‌های مختلف این شمع، از نرم افزار COMSOL Multiphysics که مبتنی بر روش المان محدود است استفاده شده است [۳۸]. جهت شبیه‌سازی جریان همرفت طبیعی در جایی که خواص سیال به دما بستگی دارد، از ترکیب چند فیزیکی جریان غیر هم‌دما^۲ در نرم افزار COMSOL استفاده شده است. لازم به ذکر است تقریب بوسینیک^۴ در این حالت وابسته به دمای محیط و غیر خطی است [۳۸].

۲-۲- فرضیات و مدل رفتاری

در مدل‌سازی صورت گرفته، اگر D قطر شمع و L طول شمع باشد ابعاد مدل برای طول، عرض و ارتفاع آن به صورت $D \times 2L \times 50 \times 2L$ در نظر گرفته شده است [۴۴]. در این مدل از لوله U شکل استفاده شده و تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی بر عملکرد شمع انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیات اولیه پژوهش حاضر به شرح زیر است:

۱) خاک کاملاً اشباع فرض می‌شود و آب داخل منافذ خاک تراکم ناپذیر است.
 ۲) دمای خاک و آب درون خاک برابر است.
 ۳) محیط هر یک از مصالح به صورت جداگانه همگن فرض شده است و خواص حرارتی و هیدرولیکی غیر قابل تغییر (همسانگرد) هستند.

۴) معادله برینکمن برای هر دو حالت همرفت طبیعی و اجباری معتبر است.

۵) دما در مرزهای مدل همواره برابر با دمای اولیه محیط و ایزوله است به جز سطح مدل که به علت وابسته بودن چگالی سیال به تغییرات دما و وجود جاذبه زمین اتفاق می‌افتد. از این رو از تقریب بوسینسک برای بررسی تغییرات چگالی سیال نسبت به دما استفاده می‌شود و می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان توان خروجی یک شمع انرژی داشته باشد [۱۹ و ۴۳]. نرم افزارهای زیادی مانند Laga- ، Thermo-Pile ، FLAC ، Ansys ، Abaqus ، mine و COMSOL با امکانات مختلفی جهت مدل‌سازی‌های عددی یک شمع انرژی در دسترس هستند. برای انتخاب نرم افزار، ملاک‌های

در معادلات فوق n تخلخل خاک است و زیرنویس‌های f و S به ترتیب معرف سیال و خاک هستند.

۲-۱-۲- مدل‌سازی حرکت آب در خاک

در این مطالعه، از معادله برینکمن که یکی از زیرمجموعه‌های فیزیک حرکت سیال در نرم افزار COMSOL است، جهت مدل‌سازی جریان آب در خاک استفاده شده است. معادله برینکمن جریان سیالات با سرعت بالا را در یک محیط متخلخل بر حسب پتانسیل جنبشی ناشی از سرعت، فشار و پتانسیل گرانشی سیال توصیف می‌کند. این معادله توسعه یافته قانون دارسی^۱ است که برای توصیف اتلاف انرژی ناشی از نیروی برشی توسط ویسکوزیته ایجاد شده است. در نتیجه، این معادله می‌تواند برای توصیف انتقال رژیم جریان از جریان با سرعت کم در یک محیط متخلخل، همانطور که توسط قانون دارسی تعریف شده است، به یک جریان با سرعت بالا در کانال‌ها، همانطور که توسط معادله ناوریر-استوکس^۲ نشان داده شده است، اعمال شود. معادله برینکمن مطابق رابطه (۵) به صورت زیر بیان می‌شود [۴۲]:

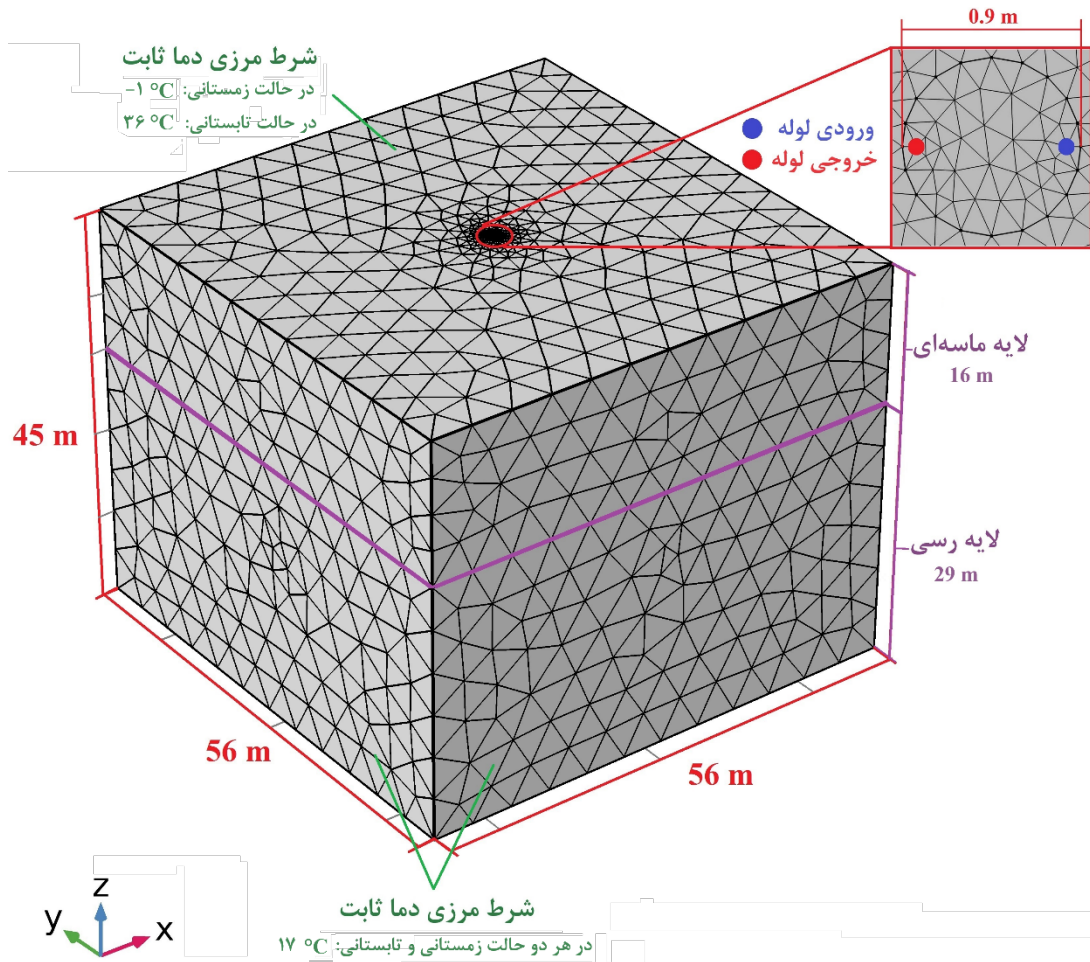
$$\begin{aligned} \frac{\rho}{n} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \frac{v}{n} \right) = -\nabla P \\ + \nabla \left[\frac{1}{n} \{ \mu (\nabla v + (\nabla v)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla v) I \} \right] \\ - \left(\kappa^{-1} \mu + \frac{Q_m}{n^2} \right) v + F \end{aligned} \quad (5)$$

در معادله فوق P نماد فشار (Pa) T ماتریکس معکوس، I ماتریس یک، κ نفوذپذیری ذاتی خاک (m^2)، F برای محاسبه نیروی گرانش و سایر نیروهای حجمی ($kg/(m^2 \cdot s^2)$) استفاده می‌شود و Q_m منبع جرم در حجم و زمان معین ($kg/(m^3 \cdot s)$) است.

جریان همرفت به علت وابسته بودن چگالی سیال به تغییرات دما و وجود جاذبه زمین اتفاق می‌افتد. از این رو از تقریب بوسینسک برای بررسی تغییرات چگالی سیال نسبت به دما استفاده می‌شود و می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر میزان توان خروجی یک شمع انرژی داشته باشد [۱۹ و ۴۳]. نرم افزارهای زیادی مانند Laga- ، Thermo-Pile ، FLAC ، Ansys ، Abaqus ، mine و COMSOL با امکانات مختلفی جهت مدل‌سازی‌های عددی یک شمع انرژی در دسترس هستند. برای انتخاب نرم افزار، ملاک‌های

3 Nonisothermal Flow Multiphysics Coupling
 4 Boussinesq approximation

1 Darcy Law
 2 Navier-stokes equation



شکل ۲. مشخصات هندسه، مش‌بندی و شرایط مرزی مدل

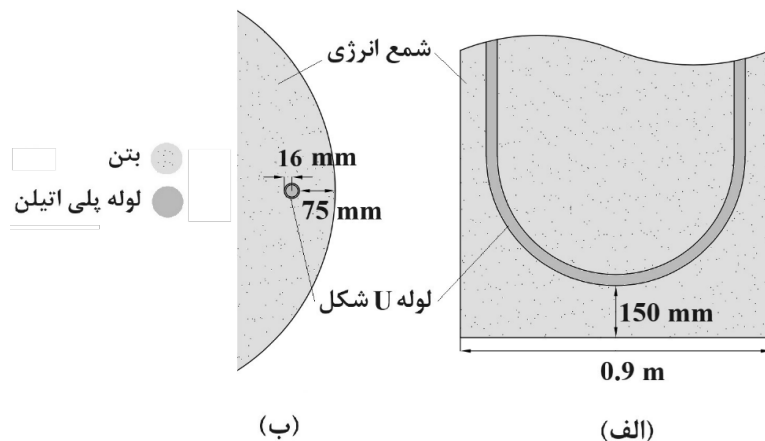
Fig. 2. Model Geometry Specifications, Meshing and Boundary Conditions

عایق در نظر می‌گیرند تا تغییرات دما در سطح زمین کمترین اثر را بر روی سیستم بگذارد [۴۴]. در این مدل‌سازی نیز این نکته رعایت شده و ضریب گذردهی حرارتی لوله تا عمق ۴ متری برابر صفر در نظر گرفته شده‌است. مشخصات شمع، لوله و ابعاد مدل در جدول ۲ عنوان شده‌است. جهت مدل‌سازی جریان آب زیر زمینی سطحی، از دولایه خاک استفاده شده‌است که لایه فوقانی ماسه و لایه زیرین رس است. سرعت جریان آب زیرزمینی برابر $5/15 \times 10^{-7}$ m/s می‌باشد و سایر مشخصات آن باتوجه به وابستگی به دما به صورت غیرخطی تغییر می‌کند و توسط نرم افزار COMSOL محاسبه می‌گردد.

جهت تعیین شرایط مرزی، از شرط مرزی دما ثابت برای جداره‌ها، کف و سطح مدل استفاده شده‌است و دمای ورودی سیال ثابت است. دمای سطح

کل حجم مدل به صورت المان‌های چهار وجهی^۱ و به ترتیب بین اندازه‌های ۰/۲ m تا ۰/۰۰۲ m و ۴/۶ m الی ۰/۲ m پیش بینی شده‌است. همچنین برای مش‌بندی سطوح نیز از المان‌های مثلثی استفاده شده‌است زیرا در این حالت کیفیت مش‌بندی بالاتر و منظم‌تر است و تراکم مناسبی از المان‌ها دیده می‌شود. همچنین با استفاده از مش مثلثی، همگرایی بین نتایج در زمان کوتاه‌تری حاصل شده‌است. لازم به ذکر است تعداد المان‌های شمع انرژی، لایه ماسه‌ای و لایه رسی به ترتیب ۴۸۰۶۸، ۶۶۱۹۷، ۶۱۳۸۷ عدد می‌باشد. پوشش بتن بر روی لوله برابر ۷۵ mm و فاصله پایین‌ترین قسمت لوله تا انتهای شمع ۱۵۰ mm در نظر گرفته شده‌است (شکل ۳). در مدل‌سازی شمع‌های انرژی معمولاً تا عمق ۴ متر از سطح زمین، لوله داخل شمع را

1 Tetrahedral



شکل ۳. تصویر شماتیک پوشش بتن بر روی لوله‌های مبادله‌گر حرارتی الف) مقطع طولی قسمت انتهایی شمع انرژی ب) مقطع عرضی شمع انرژی

Fig. 3. Schematic illustration of the concrete cover on the heat exchanger pipes a) Longitudinal section of the end of the energy pile b) Cross section of the energy pile

جدول ۲. مشخصات هندسی، فیزیکی و عملکردی مدل ساخته شده در مطالعه حاضر

Table 2. Geometric, physical and operational characteristics of the model used in this study

دامنه شمع انرژی		مشخصات هندسی
	۵۶×۵۶×۴۵	ابعاد دامنه خاکی (m)
	۲۸	طول شمع (m)
	۰/۹	قطر شمع (m)
	۳۲	قطر خارجی لوله (mm)
	۲/۹	ضخامت جدار لوله (mm)
	۷۵	پوشش بتن (mm)
	۰/۷۱۸	فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (m)
مشخصات فیزیکی		مشخصات عملکردی
بتن	۲۴۰۰	چگالی (kg/m ³)
لوله پلی اتیلن	-	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
	۸۸۰	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
	۰/۴۲	۱/۸
	۱۴	دبی ورودی سیال به داخل لوله (l/min)
	۵/۱۵×۱۰ ^{-۷}	سرعت جریان آب زیرزمینی (m/s)
	۱	دمای ورودی سیال در زمستان (°C)
	-۱	دمای سطح زمین در زمستان (°C)
	۳۱	دمای ورودی سیال در تابستان (°C)
	۳۶	دمای سطح زمین در تابستان (°C)
	۱۷	دمای دامنه خاکی (°C)

جدول ۳. مشخصات لایه‌بندی خاک در مدل حاضر

Table 3. Soil stratification characteristics in this model

خاک	عمق (m)	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$)	هدایت حرارتی ($W/m.K$)	پوکی	نفوذپذیری مطلق (m^2)
ماسه	۰ - ۱۶	۲۱۰۰	۱۴۹۲	۳/۵۲	۰/۴۵	$1/15 \times 10^{-9}$
رس	۱۶ - ۴۸	۱۸۱۰	۲۳۹۶	۱/۷۲	۰/۵	$2/25 \times 10^{-15}$

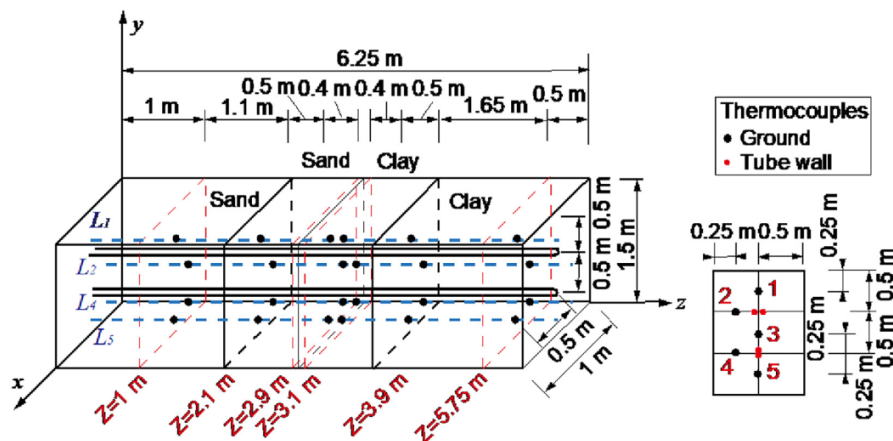
سرعت جریان آب زیرزمینی برابر $1/0.9 \times 10^{-5}$ m/s است و دمای آن برابر $25/1$ °C می‌باشد. همچنین دمای کل خاک برابر $24/2$ °C است. در این مدل از دو لوله U شکل متفاوت استفاده شده که نسبت به محور Y یکی در نیمه بالایی (لوله شماره ۱) و دیگری در نیمه پایینی (لوله شماره ۲) قرار گرفته‌است. سنسورهایی که نسبت به محور Z در عمق ۲/۱ متر قرار داده شده‌اند، تغییرات دمای خاک را در مدت زمان ۳۴ ساعت اعلام می‌کنند. برای اندازه‌گیری دما، از ۶ صفحه عمود بر محور Z و در عمق‌های مختلف استفاده شده‌است که در هر صفحه ۵ سنسور حرارتی قرار دارد و جانمایی آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌است. سیستم در طول ۱۰ ساعت، در ۴ ساعت اول روشن است و سپس به مدت ۲ ساعت برای بررسی بازیابی سیستم خاموش می‌شود و در ادامه مجدد به مدت ۴ ساعت سیستم روشن می‌گردد و سپس مجدد خاموش می‌شود. در تمام طول این مدت جریان آب در خاک حضور دارد. لازم به ذکر است که منظور از روشن و خاموش بودن سیستم وجود جریان آب در لوله‌های مبادله‌گر حرارتی، در داخل دستگاه است.

در صحت‌سنجی فوق، مقایسه نتایج لی و همکاران و مطالعه حاضر برای اختلاف دمای آب ورودی و خروجی برای لوله شماره ۲ در شکل ۵ نشان داده شده‌است که هماهنگی بسیار خوبی بین هر دو نمودار مشاهده می‌گردد، به طوری که میانگین اختلاف به کمتر از ۳ درصد می‌رسد. اختلاف مشاهده شده در ساعات ابتدایی بین مطالعه لی و همکاران و پژوهش حاضر می‌تواند ناشی از عوامل محیطی ناشناخته در مطالعه لی باشد چرا که فیزیک مسئله ایجاب می‌کند در ۴ ساعت ابتدایی آزمایش اختلاف دمای ورودی و خروجی لوله مبادله‌گر حرارتی به صورت روندی کاهشی باشد و در مرجع اشاره‌ای به دلیل افزایش اختلاف حرارت ورودی و خروجی در بین ۱ الی ۳

زمین و جریان آب ورودی به لوله برای فصول سرد به ترتیب ۱- و ۱ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌است و برای ۹۰ روز گرم به ترتیب ۳۶ و ۳۱ درجه سانتی‌گراد منظور شده‌است. همچنین دمای درون زمین برای هر دو حالت برابر ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لازم به ذکر است که ۱۶ متر اول زمین حاوی خاک ماسه‌ای و در عمق‌های بیشتر خاک از نوع رسی می‌باشد که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ بیان شده‌است. عملکرد حرارتی سیستم در یک از حالت‌های گرمایشی و سرمایشی به مدت ۹۰ روز مدلسازی شده‌است.

۲-۳- صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی و اطمینان از صحت فیزیک‌های حرارتی-هیدرولیکی مورد استفاده در این مطالعه، از یک مدل آزمایشگاهی و یک مطالعه عددی استفاده شده‌است. اختلاف بین نتایج حاصل در صحت‌سنجی این مطالعه با مطالعات معتبر انتخابی، در محدوده ۳ درصد است که نشان از دقت بالا و صحت محاسبات دارد. این درصد از اختلاف نیز می‌تواند ناشی از تفاوت در اندازه و نوع المان‌های استفاده شده در مش بندی بین این مطالعه و دو تحقیق انتخابی باشد. در صحت‌سنجی اول، از یک مدل آزمایشگاهی ساخته شده در کشور چین توسط لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ استفاده شده‌است [۲۷]. مطابق شکل ۴، این مدل شامل یک جعبه به ابعاد $1/5 m \times 6/25 m$ می‌باشد که در نقاط مختلف آن سنسور حرارتی قرار دارد و از دو لوله مسی جهت گردش آب به عنوان لوله‌های مبادله‌گر حرارتی بهره می‌برد. این جعبه به ترتیب با استفاده از خاک‌های ماسه نیمه‌اشباع، ماسه اشباع، رس اشباع و رس نیمه‌اشباع پر شده‌است. ماسه اشباع که جریان آب در آن حضور دارد از طول ۲/۱ تا ۳ متر قرار گرفته‌است.



شکل ۴. تصویر شماتیک مدل مطالعه لی و همکاران و محل قرارگیری سنسورهای حرارتی [۲۷]

Fig. 4. The schematic of the Lee et al. study model and the location of the thermal sensors [27]

مطالعه حاضر با مطالعه گشتی و همکاران در شکل ۶ نشان داده شده است که هماهنگی مناسبی بین این دو نتیجه وجود دارد و در اوج عملکرد تابستانی بیشترین اختلاف چیزی کمتر از ۹٪ می باشد و در دیگر نقاط این اختلاف به طور میانگین به حدود ۳ درصد می رسد.

۳- بحث و تحلیل نتایج

در این مطالعه، تفاوت توان خروجی در سه حالت، با توجه به خصوصیات هیدرولیکی خاک، بایکدیگر مقایسه شده اند. در حالت اول هیچ گونه جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) و همچنین همرفت طبیعی در مدل وجود ندارد. در حالت دوم جریان آب زیرزمینی وجود دارد اما از اثر جریان همرفت طبیعی صرف نظر شده است. در حالت سوم اثر همزمان جریان آب زیرزمینی و همرفت طبیعی در نظر گرفته شده است. مدلسازی با توجه به این سه حالت ذکر شده، در طی ۹۰ روز، برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان بررسی شده است. در شکل ۷ نتایج توان خروجی بر حسب وات (W) برای یک شمع انرژی در ماه های سرد سال برای هر یک از این سه حالت نشان داده شده است.

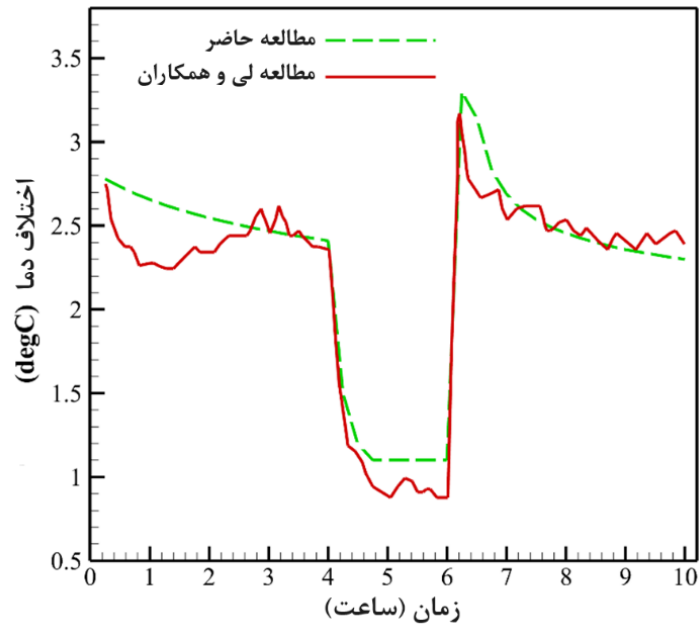
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود، زمانی که جریان آب زیرزمینی بدون در نظر گرفتن جریان همرفت طبیعی برقرار باشد، طبق انتظار میزان توان خروجی نسبت به حالتی که جریان آب زیرزمینی وجود ندارد بهبود پیدا می کند. این بهبود عملکرد و افزایش میزان تبادل حرارت در روز ۹۰ام

ساعت اولیه نشده است.

همچنین جهت تایید و اطمینان از صحت نتایج، صحت سنجی دیگری از مطالعه گشتی و همکاران [۲۶] که در دانشگاه اولو^۲ فنلاند صورت گرفته است، انجام پذیرفت. در این مطالعه گشتی و همکاران با استفاده از نرم افزار COMSOL و مدلسازی یک شمع انرژی تحت جریان آب زیرزمینی با سرعت $1/65 \times 10^{-8}$ m/s با کمک معادله برینکمن^۳ و دامنه ای خاکی، به ابعاد $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ و شمعی به قطر $0/6 \text{ m}$ و طول 20 m ، به بررسی طولانی مدت اثر جریان آب زیرزمینی بر توان خروجی یک شمع انرژی پرداخته اند.

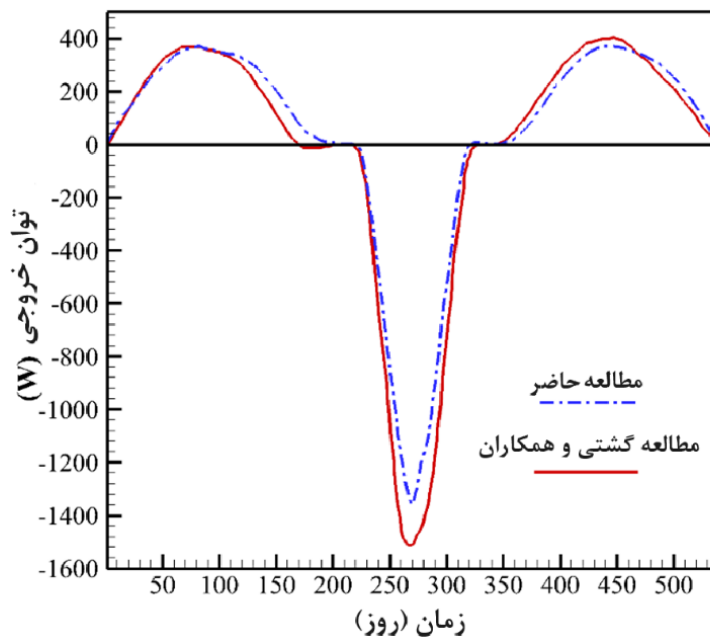
گشتی و همکاران در این مطالعه اثر دمای سطح زمین در فصل های مختلف را نیز بر عملکرد حرارتی و مکانیکی شمع انرژی در نظر گرفتند. در این مطالعه نتایج برای مدت ۱۸ ماه و با توجه به شرایط آب و هوایی کشور فنلاند در ماه های مختلف سال گزارش شده است. در ۶ ماه نخست عملکرد زمستانی مورد بررسی قرار گرفته است و سپس سیستم به مدت ۲ ماه خاموش شده است. در ادامه به مدت ۲ ماه عملکرد تابستانی مدلسازی شده است و مجدداً به مدت ۲ ماه سیستم خاموش شده است و در نهایت به مدت ۶ ماه دیگر سیستم تحت شرایط زمستانی قرار گرفته است. مقایسه نتایج

- 1 Gashti
- 2 University of Oulu
- 3 Brinkman Equation



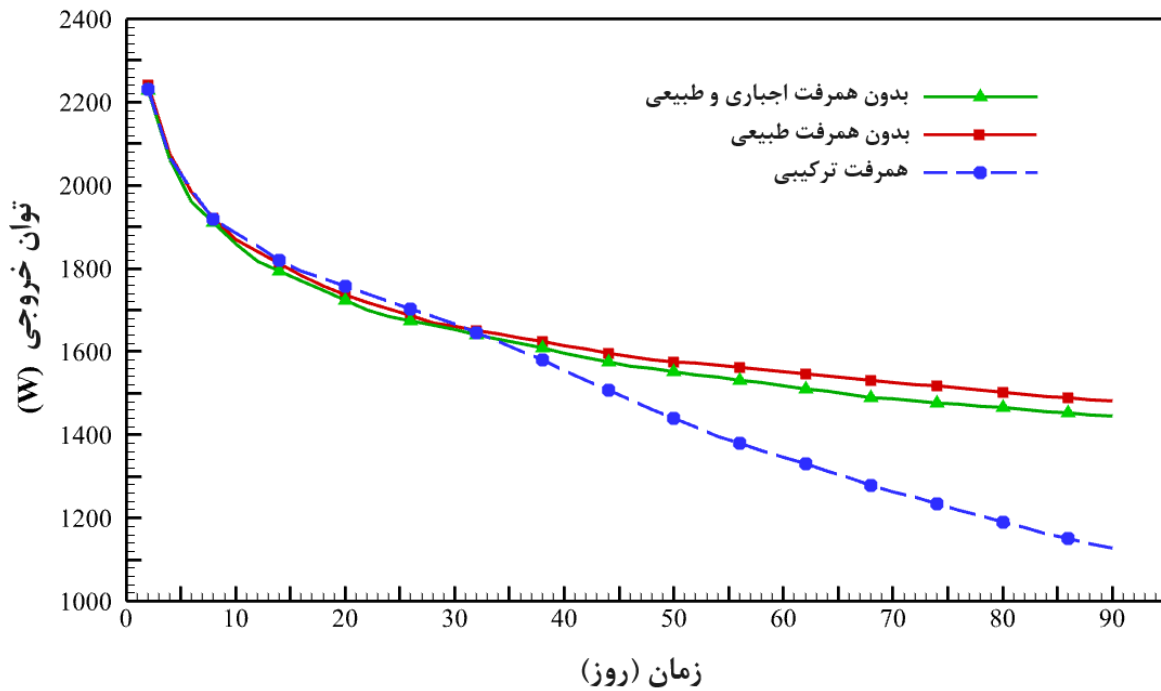
شکل ۵. مقایسه اختلاف دمای آب ورودی و خروجی در لوله شماره ۲ در مطالعه لی و همکاران با مطالعه حاضر

Fig. 5. Comparison of the temperature difference in pipe number 2 in the Lee et al. study with the present study



شکل ۶. مقایسه اختلاف توان خروجی شمع انرژی در مطالعه گشتی و همکاران با مطالعه حاضر

Fig. 6. Comparison of the output power of the energy pile in the Gashti et al. study with the present study



شکل ۷. میزان توان خروجی شمع انرژی در سه حالت مختلف در زمستان

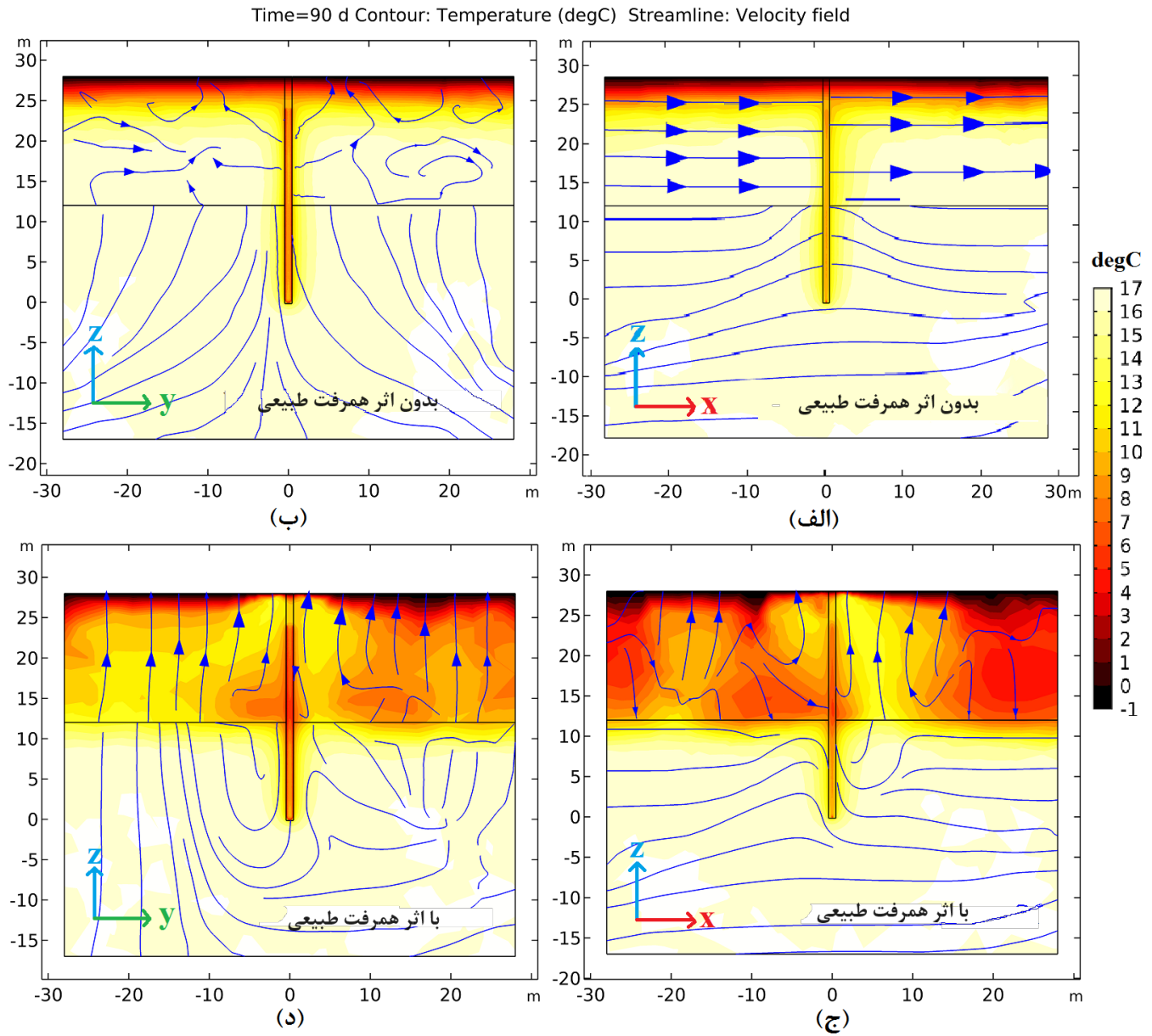
Fig. 7. The output power of the energy pile in three different scenarios in winter

در محیط خاکی دیده نمی‌شود. در شکل ۸-ج و ۸-د، در نظر گرفتن جریان همرفت طبیعی باعث می‌شود تا رژیم جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) توسط جریان همرفت طبیعی بطور کامل تحت تاثیر قرار بگیرد و جریان رفت و برگشت عمودی ناشی از همرفت طبیعی در داخل خاک ایجاد گردد. گردش عمودی سیال موجب می‌شود دمای سطح زمین به درون عمق خاک انتقال پیدا کند و دمای محیط اطراف شمع انرژی تغییر یابد. بنابراین دمای خاک در قسمت فوقانی مدل که شامل خاک ماسه‌ای و به واسطه آن دارای تراوش است، کاهش می‌یابد. در نتیجه این پدیده، توان خروجی و کارایی سیستم به طور قابل توجهی دچار افت می‌گردد.

در شکل ۸-ج و ۸-د مشاهده می‌شود که جریان همرفت طبیعی تاثیر قابل توجهی بر لایه ماسه‌ای دارد اما در لایه رسی تاثیر چندانی مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر، تفاوت در میزان نفوذپذیری و به طبع سرعت جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) در لایه‌ی ماسه‌ای و رسی می‌باشد. در واقع در لایه رسی به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین، جریان همرفت طبیعی فرصتی

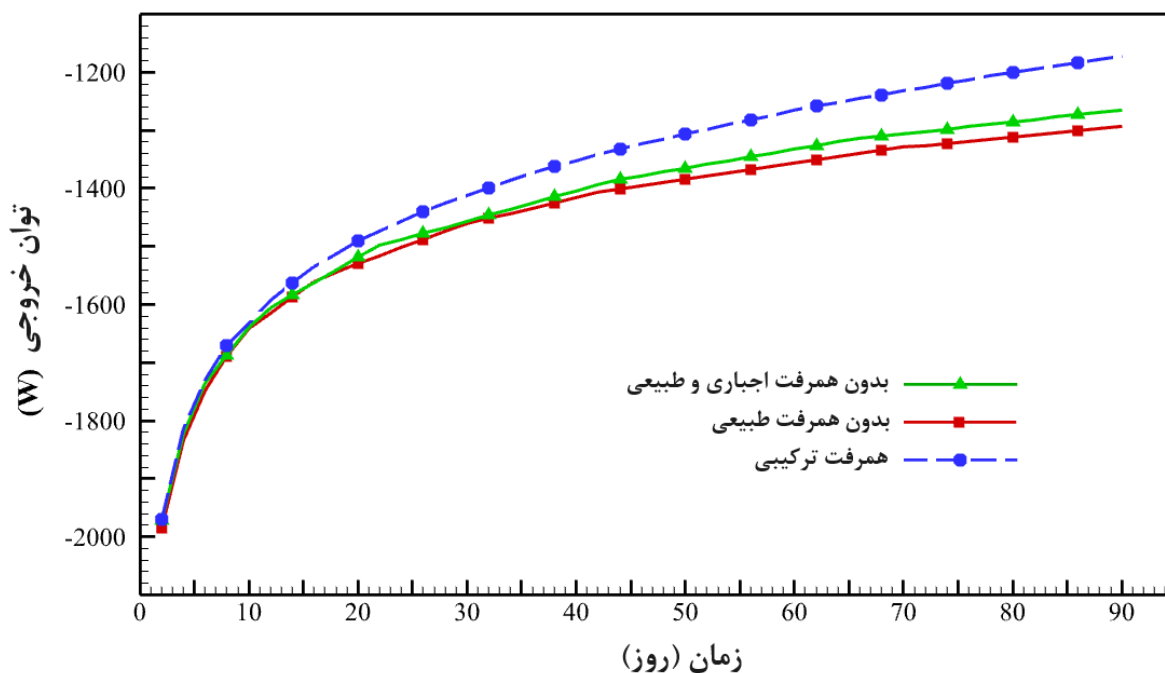
به حدود ۲/۶٪ می‌رسد. اما زمانی که جریان همرفت طبیعی در نظر گرفته شود، بر خلاف انتظار از روز ۳۰ام میزان توان خروجی به طرز چشم گیری کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در روز ۹۰ام برای لوله گذاری U شکل به بیش از ۲۷٪ می‌رسد. علت این افت توان خروجی را با کمک شکل ۸ بهتر می‌توان توضیح داد. شکل ۸، برش مقطع عرضی در وسط شمع انرژی، در دو صفحه‌ی X-Z (شکل ۸-الف و ۸-ج) و Y-Z (شکل ۸-ب و ۸-د) در روز ۹۰ام را نمایش می‌دهد. در شکل ۸، موارد الف و ب جریان آب زیرزمینی را بدون در نظر گرفتن اثر جریان همرفت طبیعی نشان می‌دهد، در حالی که در موارد ج و د این جریان در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است که جهت جریان آب زیرزمینی در راستای محور X می‌باشد که در شکل ۸ و ۱۰ خطوط جریان نمایش داده شده‌است.

در شکل ۸-الف و ۸-ب با توجه به عدم وجود همرفت طبیعی در داخل محیط خاکی، دمای سطح زمین تا حدود عمق ۶ متری، بطور یکنواخت نفوذ می‌کند و در عمق‌های بیشتر تغییر دمای زیادی ناشی از دمای سطح زمین



شکل ۸. تراوش در خاک برای وجود و عدم وجود جریان همرفت طبیعی در زمستان. الف) بدون همرفت طبیعی (در صفحه $x-z$) ب) بدون همرفت طبیعی (در صفحه $y-z$) ج) وجود همرفت طبیعی (در صفحه $x-z$) د) وجود همرفت طبیعی (در صفحه $y-z$)

Fig. 8. Seepage in the soil for the presence and absence of natural convection flow in winter. a) without natural convection (on the $x-z$ plane) b) without natural convection (on the $y-z$ plane) c) with natural convection (on the $x-z$ plane) d) with natural convection (on the $y-z$ plane)



شکل ۹. میزان توان خروجی شمع انرژی در سه حالت مختلف در تابستان

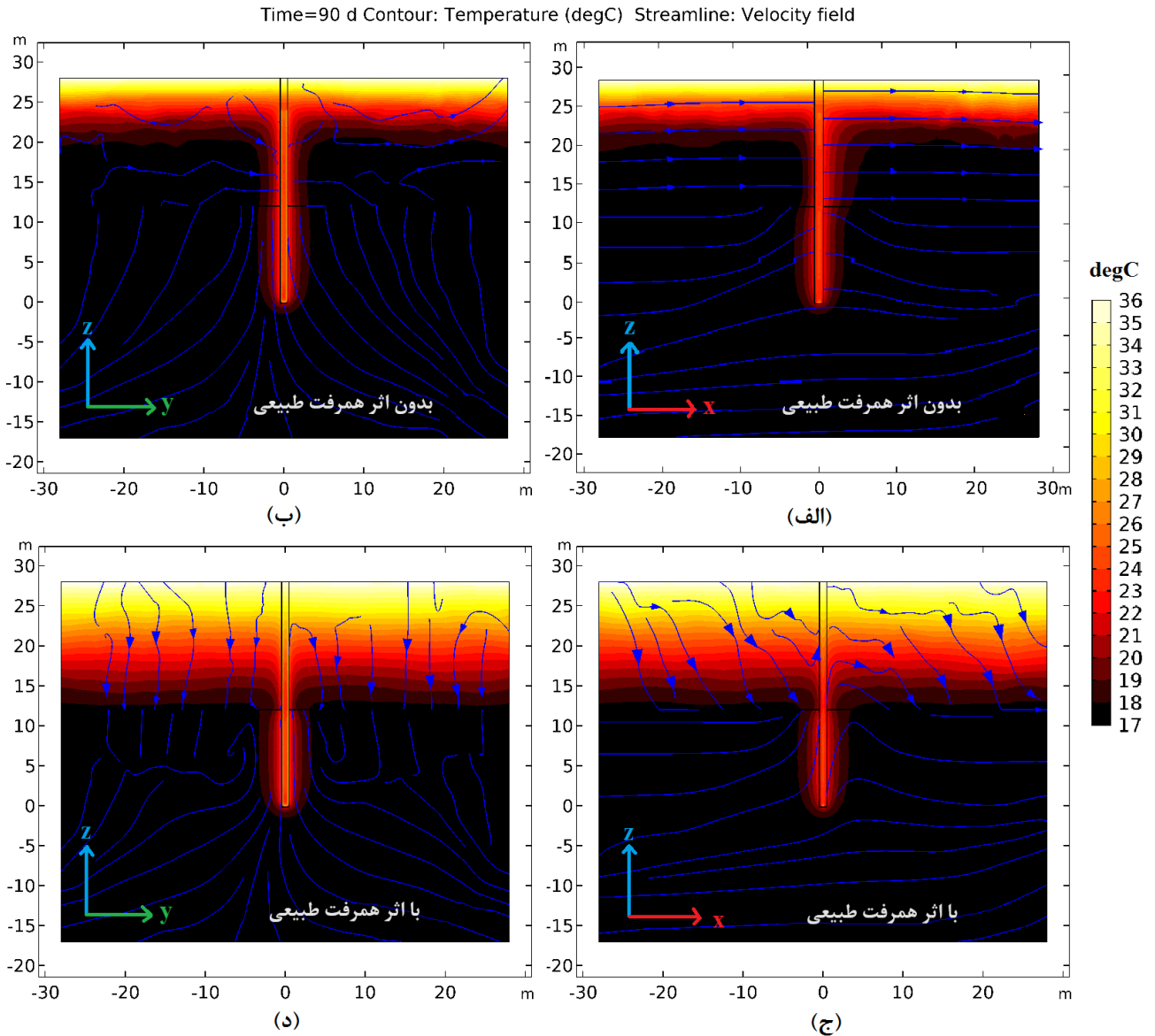
Fig. 9. The output power of the energy pile in three different scenarios in summer

تابستانی نشان می‌دهد بیشتر قابل درک است. با توجه به شکل ۱۰، همانند ماه‌های سرد سال، در ماه‌های گرم سال نیز به دلیل وجود همرفت طبیعی، جریان‌هایی عمودی در لایه ماسه‌ای ایجاد می‌گردد که به موجب آن دمای سطح زمین که دمای بیشتری نسبت به دامنه خاکی دارد، به درون خاک منتقل می‌شود و تاثیر منفی بر کارایی شمع انرژی می‌گذارد.

با مقایسه عملکرد زمستانی با عملکرد تابستانی در حضور جریان همرفت طبیعی می‌توان نکات مختلفی را استخراج کرد. با دقت به شکل ۸-ج و ۸-د می‌توان متوجه شد که در عملکرد زمستانی، جریان همرفت طبیعی باعث ایجاد ناهمگنی دمایی در لایه ماسه‌ای می‌گردد و دمای این لایه را بطور نامنظم تغییر می‌کند. این درحالی است که در عملکرد تابستانی تغییرات دما در لایه ماسه‌ای ناشی از جریان همرفت طبیعی، تقریباً بصورت یکنواخت در عمق می‌باشد. در شکل ۱۱ تفاوت در نحوه تغییر دما در لایه‌ی ماسه‌ای در زمستان و تابستان را می‌توان مشاهده کرد. دلیل این اتفاق می‌تواند تفاوت در دامنه تغییرات چگالی آب در دماهای مختلف باشد. به این صورت که در

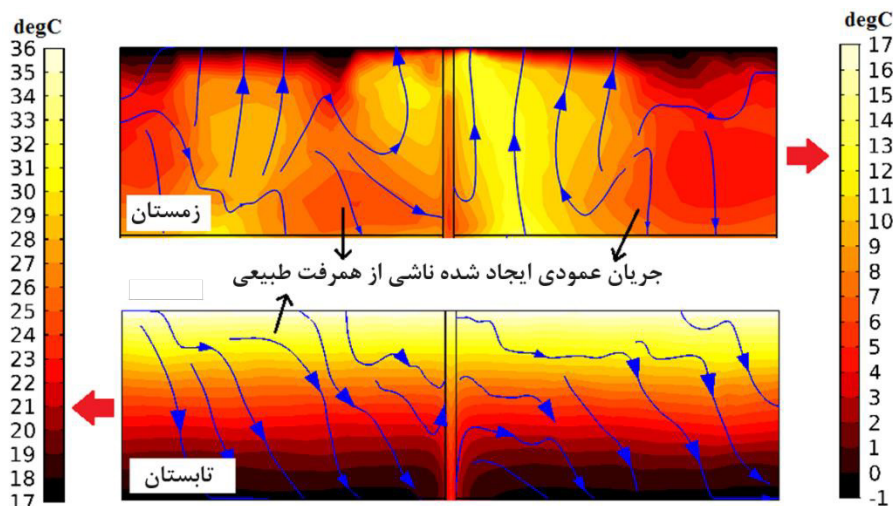
برای تاثیرگذاری پیدا نمی‌کند. این به آن معنا است که به ازای داشتن سرعت‌های بیشتر جریان آب زیرزمینی، تاثیر جریان همرفت طبیعی بر سیستم تغییر می‌کند.

این موضوع برای ۹۰ روز فصل‌های گرم نیز صدق می‌کند. اثر منفی وجود تراوش سطحی در فصل‌های گرم سال نیز چشمگیر است و در نظر نگرفتن جریان همرفت طبیعی می‌تواند موجب تاثیر قابل توجه‌ای بر عملکرد حرارتی شمع انرژی شود. در شکل ۹ میزان توان خروجی یک شمع انرژی در طول زمان با عملکرد تابستانی نمایش داده شده‌است. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که مشابه با عملکرد زمستانی، وجود جریان آب زیرزمینی بدون همرفت طبیعی موجب بهبود توان خروجی شمع انرژی نسبت به حالت بدون تراوش می‌گردد. اما با در نظر گرفتن اثر جریان همرفت طبیعی، میزان توان خروجی مجدداً دچار افت می‌شود. میزان افت توان خروجی در روز ۹۰م نسبت به حالت بدون جریان آب زیرزمینی به ۱۰٪ می‌رسد. این موضوع با کمک شکل ۱۰ که توزیع حرارت و مسیر تراوش آب در خاک را در عملکرد



شکل ۱۰. تراوش در خاک برای وجود و عدم وجود جریان همرفت طبیعی در تابستان. الف) بدون همرفت طبیعی (در صفحه $x-z$) ب) بدون همرفت طبیعی (در صفحه $y-z$) ج) وجود همرفت طبیعی (در صفحه $x-z$) د) وجود همرفت طبیعی (در صفحه $y-z$)

Fig. 10. Seepage in the soil for the presence and absence of natural convection flow in summer. a) without natural convection (on the $x-z$ plane) b) without natural convection (on the $y-z$ plane) c) with natural convection (on the $x-z$ plane) d) with natural convection (on the $y-z$ plane)



شکل ۱۱. نحوه توزیع و تغییر دما در لایه ماسه‌ای ناشی از جریان همرفت طبیعی در زمستان و تابستان (در روز ۹۰ام - در صفحه x-z) (شاخص حرارتی برای حالت زمستانی در سمت راست و برای حالت تابستانی در سمت چپ نمایش داده شده است)

Fig. 11. Temperature distribution in the sand layer due to the natural convection flow in winter and summer (on the 90th day - on the x-z plane) (the thermal index for the winter mode is displayed on the right side and for the summer mode on the left side)

۹۰ام به ۱۰٪ می‌رسد. این تفاوت در اختلاف توان خروجی در زمستان و تابستان نیز می‌تواند متأثر از تفاوت در نحوه توزیع حرارت در دامنه ماسه‌ای در عملکرد زمستانی و تابستانی باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدلسازی عددی و نرم‌افزار COMSOL، به بررسی تاثیر جریان همرفت طبیعی و تراوش سطحی آب در خاک دولایه ماسه‌ای-رسی، در فصل‌ها و شرایط مختلف بر روی یک شمع انرژی به طول ۲۸ متر، لوله‌گذاری U شکل و در مدت ۹۰ روز پرداخته شد. مدل ساخته شده با مطالعات پیشین صحت‌سنجی گردید و جهت انجام آنالیزها مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه قسمتی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش عنوان شده است:

- در سرعت‌های کم جریان آب زیرزمینی معادل $5/15 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ، جریان همرفت طبیعی ناشی از دمای سطح زمین می‌تواند سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی را تغییر دهد. جریان همرفت طبیعی که بصورت جریانی عمودی است می‌تواند دمای سطح زمین را در داخل خاک منتقل کند. اثر این جریان در خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا مثل خاک‌های ماسه‌ای که در این پژوهش نفوذپذیری مطلق آن معادل $1/15 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ در نظر گرفته

دماهای پایین‌تر، چگالی آب مقدار بیشتری نسبت به دماهای بالاتر دارد. به این سبب در فصل زمستان، به دلیل پایین‌تر بودن دما در سطح زمین، آب در نزدیکی این منطقه چگالی بیشتری به نسبت لایه‌های زیرین خاک دارد، به همین دلیل جریان عمودی همرفت طبیعی با آزادی بیشتری گردش می‌کند و به موجب آن تغییر دما در لایه ماسه‌ای بطور نامنظم تغییر می‌کند. در فصل‌های گرم سال شرایط متفاوت است. به دلیل دمای بالای سطح زمین، چگالی آب زیرزمینی در نزدیکی این منطقه کمتر از لایه‌های زیرین واقع در اعماق خاک است و به این دلیل آزادی کمتری برای گردش و انتقال حرارت در محیط خاکی را دارد. در نتیجه در لایه ماسه‌ای تغییر دما بصورت یکنواخت در عمق خاک نفوذ می‌کند و نامنظمی کمتری در آن مشاهده می‌شود. به علاوه همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، همرفت طبیعی ناشی از اختلاف دما بین سطح زمین و درون خاک تاثیر قابل‌توجهی بر لایه ماسه‌ای می‌گذارد به طوری که حتی بر همرفت طبیعی که به علت اختلاف حرارت بین شمع انرژی و محیط اطرافش می‌تواند اتفاق بیافتد غلبه می‌کند. همچنین همانطور که مشاهده شد، در عملکرد زمستانی میزان افت توان خروجی شمع انرژی در اثر ایجاد جریان همرفت طبیعی در روز ۹۰ام در حدود ۲۷٪ است در حالی که در عملکرد تابستانی میزان افت توان خروجی در روز

- (2021). (In Persian)
- [5] H. Brandl, Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Géotechnique*. 56 (2006) 81–122.
- [6] D. Pahud, M. Hubbuch, Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zürich, Rapport Final, Office Fédéral de l'énergie, Berne, Suisse. (2007).
- [7] T. Mimouni, Thermomechanical Characterization of Energy Geostructures with Emphasis on Energy Piles, 2014.
- [8] L. Laloui, A. Di Donna, Understanding the behaviour of energy geo-structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*. 164 (2011) 184–19.
- [9] Y. Tong, T. Kozai, N. Nishioka, K. Ohyama, Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP), *Biosystems Engineering*. 106 (2010) 405–411.
- [10] D.Y. Cherati, O. Ghasemi-Fare, Practical approaches for implementation of energy piles in Iran based on the lessons learned from the developed countries experiences, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 140 (2021).
- [11] Ingersoll L.R., Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, *ASHVE Journal Section, Heating, Piping and Air Conditioning* 20. (1948) 119–122.
- [12] N. Diao, Q. Li, Z. Fang, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences*. 43 (2004) 1203–1211.
- [13] N. Molina-Giraldo, P. Bayer, P. Blum, Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions, *International Journal of Thermal Sciences*. 50 (2011) 1223–1231.
- [14] O. Ghasemi-Fare, P. Basu, Influences of ground saturation and thermal boundary condition on energy harvesting using geothermal piles, *Energy and Buildings*. 165 (2018) 340–351.
- [15] G.S. Jia, Z.D. Ma, Z.H. Xia, J.W. Wang, Y.P. Zhang, L.W. Jin, Influence of groundwater flow on the ground heat exchanger performance and ground temperature distributions: A comprehensive review of analytical,

شده است بیشتر از خاک‌هایی با نفوذپذیری کم همانند خاک‌های رسی است. بصورتی که در خاک‌های رسی اشباع می‌توان از اثر جریان همرفت طبیعی صرف نظر کرد.

- اثر جریان همرفت طبیعی ناشی از دمای سطح زمین می‌تواند در عملکرد حرارتی و توان خروجی شمع انرژی اثر قابل توجهی بگذارد. در مدت ۹۰ روز از فصل‌های سرد سال، جریان همرفت طبیعی می‌تواند موجب کاهش توان خروجی شمع انرژی به میزان ۲۷٪ گردد. این افت توان خروجی در فصل‌های گرم سال به بیش از ۱۰٪ می‌رسد.

- نحوه توزیع حرارت ناشی از اثر جریان همرفت طبیعی در خاک در عملکرد تابستانی و زمستانی متفاوت است. این تفاوت ناشی از تفاوت چگالی آب در دماهای مختلف است. به این صورت که در فصل‌های سرد به این دلیل که آب در سطح زمین دارای چگالی بیشتری نسبت به آب در نقاط عمیق‌تر است، جریان همرفت طبیعی امکان حرکت آزادانه‌تری دارد و دما در لایه ماسه‌ای، بطور نامنظم تغییر می‌کند. اما در فصل‌های گرم به دلیل اینکه آب در نزدیکی سطح زمین چگالی کمتری نسبت به سایر نقاط دارد، امکان حرکت جریان همرفت طبیعی محدودتر است و دمای خاک به صورت یکنواخت در عمق تغییر می‌کند. همچنین همرفت طبیعی ناشی از اختلاف دما بین سطح زمین و درون خاک تاثیر قابل توجهی بر لایه ماسه‌ای دارد به طوری که حتی بر همرفت طبیعی که به علت اختلاف حرارت بین شمع انرژی و محیط اطرافش می‌تواند اتفاق بیافتد غلبه می‌کند.

منابع

- [1] K. Amasyali, N.M. El-Gohary, A review of data-driven building energy consumption prediction studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 1192-1205.
- [2] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski, F. Haghghat, A review on energy piles design, sizing and modelling, *Energy*, 122 (2017) 390-407.
- [3] S. R. Sheikahmadi. M.A. Kiani Fordoei. M. Oliaei, 3D numerical modeling of geothermal tunnels and receivable energy, *Civil Engineering Sharif*. 38.2 (2022) 41–50. (In Persian)
- [4] S.M. Fattahian, M.A. Kiani Fordoei, M. Oliaei, Numerical investigation of the factors affecting the output power from heat exchanger piles, *Civil Engineering Sharif*.

- considering convection at ground surface and advection of vertical water flow, *Renewable Energy*. 172 (2021) 1046–1062.
- [25] Y. Zhou, Z. xiang Zheng, G. si Zhao, Analytical models for heat transfer around a single ground heat exchanger in the presence of both horizontal and vertical groundwater flow considering a convective boundary condition, *Energy*. 245 (2022).
- [26] E.H.N. Gashti, M. Malaska, K. Kujala, Analysis of thermo-active pile structures and their performance under groundwater flow conditions, 105 (2015) 1–8.
- [27] W. Li, X. Li, Y. Peng, Y. Wang, J. Tu, Experimental and numerical studies on the thermal performance of ground heat exchangers in a layered subsurface with groundwater, *Renewable Energy*. 147 (2020) 620–629.
- [28] B.H. Dinh, G.H. Go, Y.S. Kim, Performance of a horizontal heat exchanger for ground heat pump system: Effects of groundwater level drop with soil–water thermal characteristics, *Applied Thermal Engineering*. 195 (2021).
- [29] F. Tang, H. Nowamooz, Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger, *Energy Conversion and Management*. 181 (2019) 571–583.
- [30] Y. Zhong, A. Bidarmaghz, G.A. Narsilio, N. Makasis, Thermo-hydraulic analysis in geothermal energy walls, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 132 (2023).
- [31] M. Szijártó, A. Galsa, Á. Tóth, J. Mádl-Szónyi, Numerical investigation of the combined effect of forced and free thermal convection in synthetic groundwater basins, *Journal of Hydrology*. 572 (2019) 364–379.
- [32] F. Najafian Jazi, O. Ghasemi-Fare, T.D. Rockaway, Natural convection effect on heat transfer in saturated soils under the influence of confined and unconfined subsurface flow, *Applied Thermal Engineering*. 237 (2024).
- [33] Q.I. Alqawasmeh, G.A. Narsilio, N. Makasis, M.J. Kreitmair, The impact of soil layering and groundwater flow on energy pile thermal performance, *Geomechanics numerical and experimental studies, Geothermics*. 100 (2022).
- [16] H.J.L.L. Witte, Geothermal response tests with heat extraction and heat injection: examples of application in research and design of geothermal ground heat exchangers, *Europäischer Workshop Über Geothermische Response Tests 2001*. 31 (2001) 48–63.
- [17] S. Barbieri, M. Antelmi, S. Panday, M. Baratto, A. Angelotti, L. Alberti, Innovative numerical procedure for simulating borehole heat exchangers operation and interpreting thermal response test through MODFLOW-USG code, *Journal of Hydrology*. 614 (2022).
- [18] L. Jacques, P. Pasquier, Obtaining the hydraulic and thermal properties of the main hydrostratigraphic units surrounding a standing column well using a thermal response test, *Journal of Hydrology*. 623 (2023).
- [19] N. Mehraeen, M.M. Ahmadi, O. Ghasemi-Fare, Numerical modeling of mixed convection near a vertical heat source in saturated granular soils, *Geothermics*. 106 (2022) 102566.
- [20] M.M. Tamizdoust, O. Ghasemi-Fare, A fully coupled thermo-poro-mechanical finite element analysis to predict the thermal pressurization and thermally induced pore fluid flow in soil media, *Computers and Geotechnics*. 117 (2020).
- [21] W. Zhang, H. Yang, L. Lu, Z. Fang, Investigation on the heat transfer of energy piles with two-dimensional groundwater flow, *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 12 (2017) 43–50.
- [22] J. Luo, J. Tuo, W. Huang, Y.Q. Zhu, Y.Y. Jiao, W. Xiang, J. Rohn, Influence of groundwater levels on effective thermal conductivity of the ground and heat transfer rate of borehole heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*. 128 (2018) 508–516.
- [23] S. You, X. Cheng, C. Yu, Z. Dang, Effects of groundwater flow on the heat transfer performance of energy piles : Experimental and numerical analysis, *Energy & Buildings*. 155 (2017) 249–259.
- [24] Y. Zhou, Z. han Wu, K. Wang, An analytical model for heat transfer outside a single borehole heat exchanger

- User's Guide and Reference Manual, (2018).
- [39] M.V. Lurie, Modeling of oil product and gas pipeline transportation, in: Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, 2009, pp. 1-214.
- [40] J. Bear, Y. Bachmat, Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] A. Di Donna, Thermo-mechanical aspects of energy piles, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne. 6145 (2014) 257.
- [42] 2018 COMSOL, Subsurface Flow Module. User's Guide, Subsurface Flow Module. (2018) 1–256.
- [43] D.J. Tritton, Physical fluid dynamics, Springer Science & Business Media, 2012.
- [44] N. Batini, A.F. Rotta Loria, P. Conti, D. Testi, W. Grassi, L. Laloui, Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions, Applied Thermal Engineering. 86 (2015) 199–213.
- for Energy and the Environment. 38 (2024).
- [34] W. Yang, C. Zhang, T. Sun, Y. Qiang, F. Wang, A. Liu, Experimental and numerical study on thermo-mechanical behaviour of energy pile under different constraints, Applied Thermal Engineering. 243 (2024).
- [35] B.L. Amatya, K. Soga, P.J. Bourne-Webb, T. Amis, L. Laloui, Thermo-mechanical behaviour of energy piles, Géotechnique. 62 (2012) 503–519.
- [36] Y. Lou, P. fei Fang, X. yu Xie, C.S.A. Chong, F. yuan Li, C. yang Liu, Z. jin Wang, D. yong Zhu, Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow, Geomechanics for Energy and the Environment. 28 (2021).
- [37] S. Park, D. Lee, H.-J. Choi, K. Jung, H. Choi, Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete energy pile: Coil-type GHEX (ground heat exchanger), Energy, 81 (2015) 56-66.
- [38] Comsol, COMSOL Multiphysics™ Version 4/5:

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Fattahian, M. H. Sobhdam, M. M. Ahmadi, Numerical modeling and analysis of the effect of surface groundwater flow and natural convection on the heat exchange of energy pile, Amirkabir J. Civil Eng., 56(5) (2024) 629-650.

DOI: [10.22060/ceej.2024.23014.8089](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.23014.8089)

