



Investigation of the Effects of Concrete's Thermal Characteristics on the Thermal Performance of Geothermal Piles Considering Mixed Convection

Farhang Azizi Zade, Mohammad Mehdi Ahmadi *

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

ABSTRACT: Geothermal piles are multifunctional structures that simultaneously serve structural and thermal purposes and are considered an emerging approach for utilizing renewable geothermal energy, contributing effectively to sustainable development. The thermal performance of these piles is influenced by environmental conditions as well as various hydraulic and thermal parameters. In this study, a finite element numerical model is employed to investigate the influence of concrete thermal properties on the thermal performance of a geothermal pile, taking into account the effects of a saturated layered soil, groundwater flow, and the associated natural and forced convective heat transfer mechanisms. The study addresses the question of which type of concrete provides superior thermal performance for geothermal piles. Furthermore, a quantitative comparison of the influence of these parameters on the heat exchange capacity of the energy pile is conducted using a sensitivity analysis approach. The results indicate that the thermal conductivity of concrete, with a sensitivity coefficient of 0.2607, has the most significant impact on thermal performance, whereas the specific heat capacity and mass density of concrete exhibit the least influence. Consequently, optimizing concrete thermal properties, particularly prioritizing thermal conductivity, can be considered an effective criterion for selecting an appropriate concrete mix design for geothermal piles from a thermal performance perspective, ensuring maximum system efficiency.

Review History:

Received: Dec. 24, 2024

Revised: Jan. 25, 2026

Accepted: Feb. 21, 2026

Available Online: Mar. 01, 2026

Keywords:

Geothermal Piles

Natural Convection

Forced Convection

Heat Exchange Capacity

Numerical Modeling

1- Introduction

Utilizing renewable energy sources is one of the most important methods for reducing carbon dioxide and improving social, economic, and environmental issues that today's society in every country face, and it will be one of the challenges for future generations [1].

Buildings approximately consume 40% of a country's total energy resources daily and contribute to 30% of greenhouse gas emissions. Therefore, utilizing renewable energy sources for heating and cooling building spaces is a significant step towards reducing greenhouse gas emissions [2].

One of the most common methods of utilizing geothermal energy, which operates integrally with heat pumps, is geothermal piles or energy piles. These systems function as a closed-loop system with two purposes: serving as deep foundations and utilizing the temperature difference between the ground and the incoming fluid as a heat exchanger [3].

Numerous other studies have been conducted on the thermo-hydraulic behavior and thermal performance of geothermal piles. Previous researchers and the technical literature on geothermal piles have considered conditions such as layered soil, natural convection, and forced convection, most studies have not simultaneously examined all three conditions. In

this research, the thermal performance of a single geothermal pile is studied using a three-dimensional finite element numerical model with COMSOL Multiphysics® software [4], considering layered soil conditions, groundwater flow (forced convection), and natural convection simultaneously. This study conducts a parametric analysis on the thermal power of the geothermal pile under the influence of thermal parameters of concrete, such as density, thermal conductivity, and specific heat capacity. By performing a scaled sensitivity analysis, the most effective parameters on the heat transfer capacity of energy piles are identified to answer the question: "Which type of concrete provides better thermal performance for geothermal piles?" This research can assist design engineers in making informed decisions regarding the selection of concrete mixture designs and additives for energy piles from a thermal performance perspective.

2- Methodology

In this study, the COMSOL Multiphysics® software [4] was employed for modeling and numerically solving the coupled equations of energy conservation, mass conservation, and momentum conservation using the finite element method. Considering the low groundwater flow velocity

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



under the assumed hydraulic conditions of this research, the physics of flow according to Darcy's law was utilized for the groundwater flow. The water flow inside the heat exchanger pipes was modeled as one-dimensional non-isothermal flow, and the heat transfer physics was considered for all three phases: solid, porous medium, and fluid.

In this research, it was assumed that local thermal equilibrium is established at every point in the soil, and that the soil is saturated. Additionally, the groundwater and the fluid inside the heat exchanger pipes were assumed to be incompressible.

The numerical model developed includes an energy pile with a length of 25 meters and a diameter of 0.6 meters, situated in a domain with dimensions of 25×25×50 meters. The boundary conditions of the numerical model entail assigning a constant temperature to the six faces of the domain and one-way groundwater flow at a velocity corresponding to the hydraulic permeability of the soil layers. Additionally, the energy pile surface is assumed to be insulated, and the input fluid, with a constant flow rate of 0.35 m³/h and a time-dependent temperature, is circulated through the inlet pipe in a short-term analysis lasting 7 days.

The numerical model developed is validated based on the analytical and numerical studies of previous researchers. Using a scaled sensitivity coefficient [5], a quantitative and qualitative comparison of the thermal parameters of the energy pile's concrete is carried out from the results.

3- Results and Discussion

A parametric analysis was conducted on the thermal parameters of concrete used in geothermal piles. The parameters studied include the density, specific heat capacity, and thermal conductivity of the concrete. Based on a review of the literature, the real variations of these parameters were examined.

Considering the range of values and different variations of each thermal parameter of concrete, a sensitivity analysis was conducted using a scaled sensitivity coefficient [5] to accurately assess and compare the impact of each parameter on the output power of the geothermal pile. The results of this sensitivity analysis and the calculation of the sensitivity coefficient for each parameter are presented in Figure 1.

In Figure 1, it can be observed that the sensitivity coefficient values for each of the parameters (density, specific heat capacity, and thermal conductivity of the concrete) are respectively 0.0204, 0.0172, and 0.2607. The most significant parameter is identified as thermal conductivity. Therefore, to develop an optimal mixture design aimed at enhancing the thermal capacity of a geothermal pile, materials with higher thermal conductivity should be prioritized, followed by higher density and specific heat capacity.

4- Conclusions

In this paper, a numerical study was conducted on the impact of thermal parameters of concrete, including density, specific heat capacity, and thermal conductivity, on the thermal performance of a geothermal pile, with an emphasis

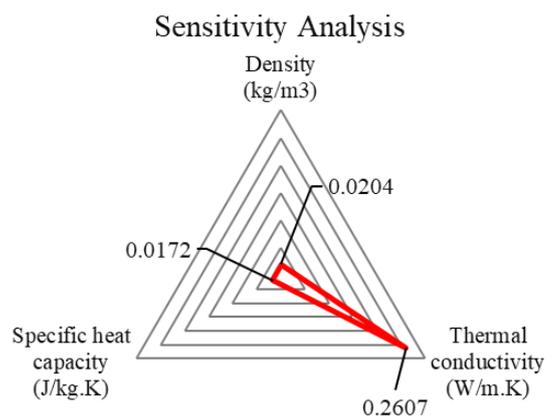


Fig. 1. Sensitivity Analysis Results and Calculation of Sensitivity Coefficients on Concrete Thermal Parameters.

on its hydrothermal behavior under conditions of natural convection, forced convection, and layered soil, using the finite element software COMSOL Multiphysics® [4] over a week period, considering the cooling process. The numerical model was validated with analytical and numerical studies from previous research. Using a dimensionless parameter called the sensitivity coefficient, the significance of each parameter was determined for selecting additives and mixture design of concrete materials to optimize the thermal performance of geothermal piles. The conclusions derived from this research are as follows:

- The outlet fluid temperature of the heat-exchange pipe exhibits a high rate of decline during the initial operating hours; however, this rate gradually decreases over time until the outlet temperature stabilizes within the range of approximately 28.8 °C to 30.7 °C, reflecting the attainment of thermal equilibrium between the energy pile system and the surrounding ground.
- The final heat transfer rate of the energy pile increases by approximately 0.3%, 2.02%, and 28% as a result of variations in concrete mass density from 2200 to 2500 kg/m³, specific heat capacity from 837 to 2200 J/(kg·K), and thermal conductivity from 1.6 to 3.6 W/(m·K), respectively.
- Among the thermal properties of concrete, thermal conductivity is the most influential parameter governing the thermal capacity of the energy pile, with a sensitivity coefficient of 0.2607. Consequently, in selecting the concrete mix design for energy piles, thermal conductivity should be prioritized over density and specific heat capacity to enhance the thermal output of the system.
- High-strength concretes or concretes reinforced with graphite additives are considered effective options for improving the thermal performance of energy piles.

References

- [1] M. De Moel, P.M. Bach, A. Bouazza, R.M. Singh, J.O. Sun, Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9) (2010) 2683-2696.
- [2] Z. Mohamad, F. Fardoun, F. Meftah, A review on energy piles design, evaluation, and optimization, *Journal of Cleaner Production*, 292 (2021) 125802.
- [3] 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) 110748.
- [4] COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Sweden., in.
- [5] H. Liu, F. He, C. Wang, A. Bouazza, G. Kong, Z. Sun, Heat transfer performance of energy pile and borehole heat exchanger: A comparative study, *Journal of Building Engineering*, 97 (2024) 110721.



بررسی اثر خصوصیات حرارتی بتن بر عملکرد حرارتی شمع‌های زمین‌گرمایی با در نظر گرفتن اثر همرفت ترکیبی

فرهنگ عزیز زاده، محمدمهدی احمدی*

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۰

کلمات کلیدی:

شمع‌های زمین‌گرمایی
همرفت طبیعی
همرفت اجباری
توان تبادل حرارت
مدل‌سازی عددی

خلاصه: شمع‌های زمین‌گرمایی سازه‌هایی با دو عملکرد سازه‌ای و حرارتی هستند که به عنوان یکی از روش‌های جدید استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر زمین‌گرمایی و گامی موثر جهت توسعه‌ی پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد حرارتی این شمع‌ها تحت تاثیر شرایط محیطی و پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی متعددی قرار می‌گیرد. در این تحقیق با استفاده از یک مدل‌سازی عددی اجزای محدود، اثر پارامترهای حرارتی بتن بر عملکرد حرارتی یک شمع زمین‌گرمایی با در نظر گرفتن اثر زمین لایه‌ای اشباع، جریان آب زیرزمینی و به دنبال آن، اثرات انتقال حرارت همرفت طبیعی و اجباری مورد بررسی قرار می‌گیرد و به این سوال پاسخ داده می‌شود که در چه نوع بتن مصرفی، شمع‌های زمین‌گرمایی عملکرد حرارتی بهتری دارند و در نهایت مقایسه‌ی کمی میان اثر این پارامترها بر توان تبادل حرارتی شمع‌انرژی به کمک یک ضریب حساسیت در تحلیل حساسیت انجام می‌شود. نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد ضریب هدایت حرارتی بتن با ضریب حساسیت ۰/۲۶۰۷ بیشترین اثر و برعکس پارامترهای ظرفیت گرمایی ویژه بتن و چگالی جرمی کمترین تاثیر را بر بهبود عملکرد حرارتی این سیستم دارند و بهینه‌سازی این پارامترها با اولویت ضریب رسانایی حرارتی بتن می‌تواند به منظور انتخاب طرح اختلاط مناسب جهت اجرای این نوع شمع‌ها از دیدگاه عملکرد حرارتی مورد ارزیابی قرار بگیرد تا طرح نهایی بیشترین بازدهی را فراهم آورد.

منابع مختلفی از انرژی‌های پاک همانند انرژی باد جهت استفاده توسط توربین‌های بادی فراساحلی [۳، ۴]، انرژی خورشیدی جهت استفاده در پنل‌های خورشیدی [۵]، انرژی زمین‌گرمایی جهت استفاده در صنعت [۶] و... وجود دارد که یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در این راستا، انرژی‌های زمین‌گرمایی سطحی هستند که در عمقی بین ۱ m تا ۲۰۰ m از سطح زمین قابل دسترسی است و به منظور دسترسی به این نوع انرژی اغلب از پمپ‌های حرارتی با منشا زمین^۲ (GSHP) استفاده می‌شود [۲، ۷]. پمپ‌های حرارتی با منشا زمین (GSHP) یک راه حل زیست‌محیطی و مناسب جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی حرارتی ساختمان‌ها به شمار می‌رود که از سه واحد تبادل‌کننده‌ی حرارت (شمع زمین‌گرمایی^۳ و یا مبدل حرارتی درون گمانه‌ای^۴)، سیستم پمپ حرارتی و لوله‌های انتقال حرارت تشکیل شده‌اند. این پمپ‌ها معمولاً در یک سیستم به دو صورت

۱- مقدمه

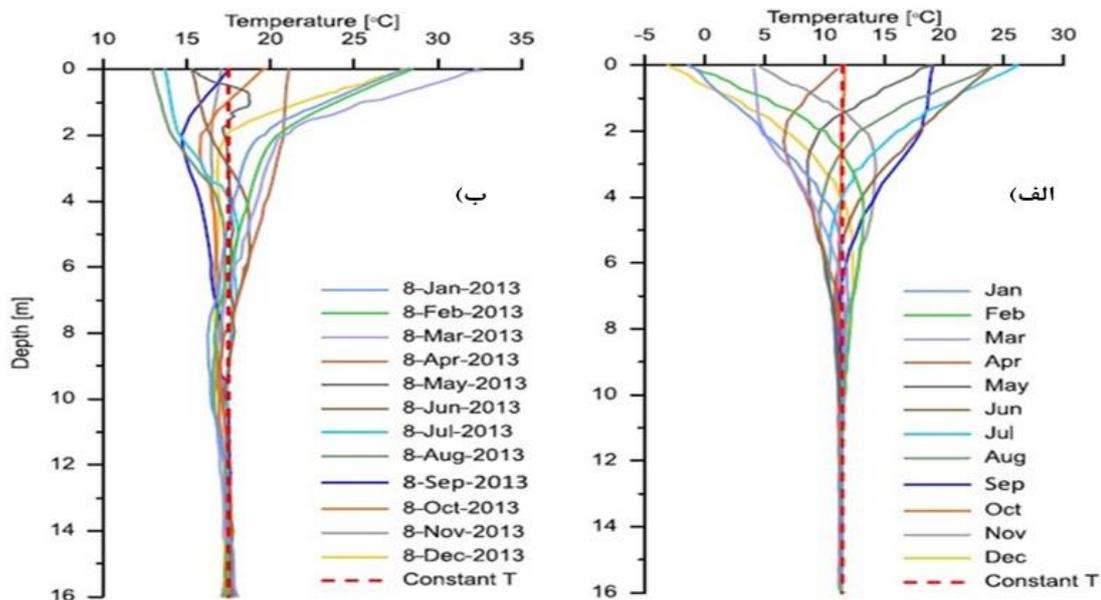
استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از مهم‌ترین روش‌های کاهش کربن دی‌اکسید^۱ و بهبود مشکلات اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی است که جامعه‌ی امروز در هر کشوری با آن روبرو است و یکی از چالش‌های زندگی آیندگان خواهد بود [۱]. مصرف انرژی توسط ساختمان‌های مسکونی و تجاری جهت سرمایش و گرمایش فضای ساختمان، چالش قابل توجهی است که استراتژی‌های مختلفی جهت طراحی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی آن‌ها با رویکرد حفظ منابع انرژی و توسعه‌ی پایدار بکار برده می‌شود [۱، ۲]. ساختمان‌ها به طور تقریبی روزانه ۴۰٪ از کل منابع انرژی یک کشور را مصرف می‌کنند و در ۳۰٪ از انتشار گازهای گلخانه‌ای سهم دارند. بنابراین استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به جهت سرمایش و گرمایش فضای ساختمان‌ها گام موثری در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بحساب می‌آید.

2. Ground Source Heat Pump
3. Energy Pile
4. Borehole Heat Exchanger

1. CO₂

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu





شکل ۱. پروفیل تغییرات دمای زمین با عمق در ماه‌های مختلف سال [۸]: (الف) لندن، انگلستان (ب) ملبورن، استرالیا.

Fig. 1. Profile of Ground Temperature Variations with Depth in Different Months of the Year [8]: (a) London, England (b) Melbourne, Australia.

شمع‌های انرژی^۳ است که به عنوان یک سیستم حلقه‌بسته دارای دو عملکرد، یکی استفاده به عنوان فونداسیون عمیق و دیگری استفاده از اختلاف دمای زمین با سیال ورودی به عنوان تبادل کننده حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. این شمع‌ها می‌توانند به صورت درجاریز و کوبشی اجرا شوند و عمدتاً از بتن مسلح و لوله‌های تبادل کننده‌ی حرارت از جنس PVC و HDPE ساخته می‌شوند؛ شکل ۲ اجزای یک شمع زمین گرمایی را به طور شماتیک نشان می‌دهد [۸، ۹].

مطالعات رفتار هیدروترمال^۴ شمع‌های زمین گرمایی نشان داده است وجود آب میان حفرات ذرات خاک تحت تاثیر تغییرات دمایی خاک قرار گرفته و اثر قابل توجهی بر پاسخ حرارتی این شمع‌ها می‌گذارد. عمدتاً انتقال حرارت به علت وجود سیال آب به سه روش همرفت طبیعی^۵، همرفت اجباری^۶ و همرفت ترکیبی^۷ انجام می‌شود که همرفت طبیعی نشان دهنده‌ی انتقال حرارت بدلیل تغییر در چگالی آب ناشی از تغییرات دما، همرفت اجباری به علت حرکت جریان آب به دلایلی مانند اختلاف ارتفاع فشار کل و همرفت

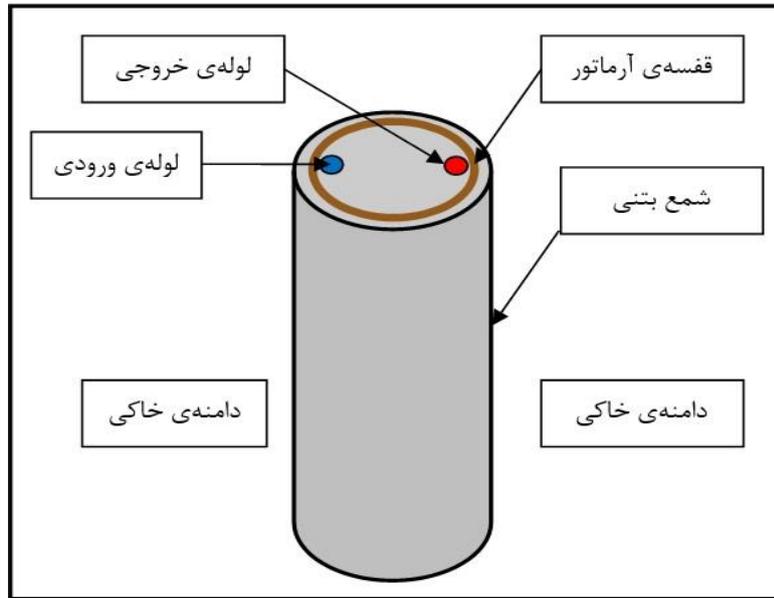
حلقه‌بسته^۱ و حلقه‌باز^۲ اجرا می‌شوند که در نوع اول از جریان آب به واسطه‌ی وجود رودخانه‌ها، آبخوان‌ها و جریان آب زیرزمینی و در نوع دوم از چرخش سیال تبادل کننده‌ی حرارت درون حلقه‌ی بسته‌ی لوله‌های انتقال حرارت استفاده می‌شود که این لوله‌ها می‌توانند به صورت افقی یا قائم درون سیستم قرار بگیرند [۵، ۷]. مزیت قرارگیری لوله‌های قائم جلوگیری از اثرپذیری نوسانات دمای سطح زمین نسبت به عمق است و معمولاً بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

نوسانات دمای سطح زمین در اکثر مناطق تا عمقی حدود ۶ m الی ۸ m از سطح زمین ادامه دارد و پس از آن به یک حالت نسبتاً پایدار دمایی می‌رسد که این دما با توجه به منطقه‌ی اجرای سیستم بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی معمولاً بین ۱۰ °C الی ۲۵ °C متغیر است. شکل ۱-الف و ۱-ب به ترتیب تغییرات دما از سطح زمین را برای دو شهر لندن و ملبورن نشان می‌دهد [۸].

یکی از رایج‌ترین روش‌های بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی که با پمپ‌های حرارتی به صورت یکپارچه عمل می‌کند شمع‌های زمین گرمایی یا

3. Energy piles
4. Hydrothermal
5. Natural Convection
6. Forced Convection
7. Mixed Convection

1. Closed loop
2. Open loop



شکل ۲. شماتیک اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک شمع زمین‌گرمایی.

Fig. 2. Schematic of the components of a geothermal pile.

[۱۳] یک سری تحلیل اجزای محدود به منظور کاوش اثر همرفت طبیعی بر عملکرد حرارتی گروهی از شمع‌های زمین‌گرمایی انجام دادند و نتیجه گرفتند همرفت طبیعی می‌تواند اثر تبادل حرارت بر واحد طول شمع را به طور متوسط ۲۵٪ افزایش دهد و این اثر با افزایش نفوذپذیری ذاتی خاک و دبی آب ورودی به سیستم شمع‌انرژی بهبود پیدا می‌کند. لیو و همکاران^۳ [۱۴] یک مطالعه‌ی پارامتری شامل پارامترهای دبی ورودی، دمای سیال ورودی، قطر لوله، ضریب انتقال حرارت و دمای خاک بر نرخ انتقال حرارت یک شمع‌انرژی و یک تبادل‌کننده‌ی حرارت درون‌گمانه‌ای به کمک یک تست صحرائی و مدل‌سازی عددی انجام دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد تبادل‌کننده‌ی حرارتی بازدهی کمتری نسبت به شمع‌انرژی دارد و اینکه دمای آب ورودی و قطر لوله به ترتیب موثرترین پارامتر بر عملکرد حرارتی شمع هستند. القواسمه و همکاران^۴ [۱۱] به کمک یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی عملکرد حرارتی شمع‌انرژی در یک زمین لایه‌ای با در نظر گرفتن جریان آب زیرزمینی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند وجود خاک لایه‌ای اثر قابل ملاحظه‌ای در عملکرد حرارتی یک شمع زمین‌گرمایی خصوصاً در بارهای حرارتی غیریکنواخت دارد. قاسمی‌فرع و باسو^۵ [۱۵] عملکرد

3. Liu et al.

4. Alqawasmeh et al.

5. Ghasemi-Fare and Basu

ترکیبی شامل هر دو پدیده به صورت همزمان می‌شود [۱۰]. یکی از مهم‌ترین گام‌های لازم قبل اجرای شمع‌های زمین‌گرمایی، بهینه‌سازی طراحی حرارتی این نوع شمع‌ها با در نظر گرفتن الزامات جنبه‌ی سازه‌ای است. برخی از جنبه‌های طراحی که باید در نظر گرفته شوند شامل اثر شرایط ژئوتکنیکی (نسبت تخلخل خاک، لایه‌بندی زمین، چگالی خاک و ...)، شرایط حرارتی مصالح (ضریب انتقال حرارت، ظرفیت گرمایی ویژه و ...)، شرایط هیدرولیکی محل (جریان آب زیرزمینی، قدرت انتقال آب توسط خاک و ...) و شرایط هندسی سیستم (قطر و طول شمع، چیدمان لوله و ...) است که بر افزایش بازدهی انرژی شمع‌های حرارتی اثر می‌گذارد [۱۱].

مطالعات متعددی در حوزه بررسی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی انجام گرفته است که به شکل‌های تست صحرائی، آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی و تحلیلی وجود دارد. من و همکاران^۱ [۱۲] یک مطالعه‌ی تحلیلی به منظور طراحی و شبیه‌سازی شمع‌های زمین‌گرمایی و مبدل‌های حرارتی درون‌گمانه‌ای با در نظر گرفتن اثر بعد شعاعی و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آن انجام دادند که به طور خاص می‌تواند پاسخ حرارتی یک تبادل‌کننده‌ی حرارتی درون‌گمانه‌ای را در مدت زمان کوتاهی ارائه دهد. تیواری و باسو^۲

1. Man et al.

2. Tiwari and Basu

بررسی مطالعات محققین قبلی و تاریخچه‌ی ادبیات فنی حوزه‌ی شمع‌های زمین‌گرمایی، در نظر گرفتن شرایط محیطی مانند خاک لایه‌ای، اثر همرفت طبیعی و همرفت اجباری مشاهده می‌شود اما در تحقیقات انجام شده به بررسی و تحلیل حساسیت خصوصیات حرارتی انواع بتن تحت تمام شرایط ذکر شده اشاره نشده است و جای خالی یک مطالعه‌ی پارامتری جامع در مورد خصوصیات حرارتی شامل چگالی جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب رسانایی حرارتی بتن شمع‌انرژی با در نظر گرفتن شرایط اشاره شده و ارائه‌ی یک معیار ارزیابی جهت مقایسه‌ی این پارامترها وجود دارد.

تحقیق حاضر به کمک یک مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اجزای محدود توسط نرم‌افزار [۲۹] COMSOL Multiphysics و در نظر گرفتن شرایط خاک لایه‌ای، جریان آب زیرزمینی (همرفت اجباری) و همرفت طبیعی به صورت همزمان، عملکرد حرارتی یک تک‌شمع زمین‌گرمایی را بررسی می‌کند. در این پژوهش یک مطالعه‌ی پارامتری بر توان حرارتی شمع زمین‌گرمایی تحت اثر پارامترهای حرارتی انواع بتن نظیر چگالی جرمی، ضریب انتقال حرارت و ظرفیت گرمایی ویژه انجام می‌شود و با انجام یک آنالیز حساسیت مقیاس شده، موثرترین پارامترها بر توان انتقال حرارت شمع‌انرژی مشخص می‌شود تا به این سوال پاسخ داده شود که «در چه نوع بتن مصرفی، شمع‌های زمین‌گرمایی عملکرد حرارتی بهتری دارند؟». این تحقیق می‌تواند به مهندسين طراح کمک کند تا جهت انتخاب طرح اختلاط و افزودنی‌های بتن شمع‌انرژی با دیدگاه عملکرد حرارتی، انتخاب هوشمندانه‌ای با شناخت خصوصیات حرارتی مصالح مورد استفاده داشته باشند.

۲- تئوری و فیزیک مسئله

در این تحقیق از نرم‌افزار [۲۹] COMSOL Multiphysics جهت مدل‌سازی و حل عددی معادلات همبسته‌ی پایستگی انرژی، پایستگی جرم و پایستگی تکانه به روش اجزای محدود استفاده شده است. با توجه به سرعت پایین جریان آب زیرزمینی در شرایط هیدرولیکی فرض شده‌ی این تحقیق، از فیزیک جریان منطبق بر قانون داریسی^۵ در محیط متخلخل خاک استفاده شد [۱۰]. جریان آب داخل لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت از نوع جریان یک‌بعدی غیر هم‌دماء انتخاب و فیزیک انتقال حرارت برای هر سه محیط جامد، متخلخل و سیال در نظر گرفته شد.

حرارتی یک شمع زمین‌گرمایی در یک خاک ماسه‌ای اشباع را به کمک تست آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با تاکید بر اثر همرفت طبیعی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند وجود اثر همرفت طبیعی می‌تواند ۱۲ درصد توان خروجی از شمع‌انرژی را بهبود ببخشد. ژو و همکاران^۱ [۱۶] عملکرد حرارتی یک تک‌شمع و گروهی از شمع‌های زمین‌گرمایی دارای سه لوله‌ی U شکل را توسط مدل‌سازی عددی و تست صحرایی سنجیدند. آن‌ها نتیجه گرفتند اثر ضریب انتقال حرارت بتن بر بازدهی حرارتی شمع‌انرژی بیشتر از اثر ضریب انتقال حرارت خاک است و همچنین توان انتقال حرارت بر واحد طول شمع با گذشت زمان به تدریج کاهش می‌یابد. مهرآیین و همکاران^۲ [۱۰] یک مطالعه‌ی اجزای محدود بر عملکرد یک منبع حرارتی با در نظر گرفتن هر دو اثر همرفت طبیعی و اجباری در یک خاک همگن اشباع انجام دادند و اثر پارامترهای سرعت جریان آب زیرزمینی و نفوذپذیری خاک را بر رفتار هیدرولیکی - حرارتی خاک بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند اثر همرفت طبیعی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر رفتار هیدرولیکی - حرارتی خاک داشته باشد و صرف نظر از آن می‌تواند منجر به نتایج غیردقیق شود. یو و همکاران^۳ [۱۷] یک تحقیق شامل تست صحرایی و مدل‌سازی عددی در خصوص تاثیر جریان آب زیرزمینی بر عملکرد شمع‌های انرژی در یک خاک لایه‌ای انجام دادند. با اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و نرخ تبادل حرارت هر شمع اثر جریان آب زیرزمینی بر مشخصات ترموفیزیکی خاک مشخص گردید و به کمک مدل‌سازی عددی تحت سرعت‌های مختلف جریان آب تاثیر آن بر عملکرد حرارتی شمع‌های زمین‌گرمایی بررسی شد و نتیجه گرفته شد که با افزایش سرعت جریان آب زیرزمینی میانگین دمای آب ورودی و خروجی سیال تبادل‌کننده‌ی حرارت کاهش می‌یابد. ژنگ و همکاران^۴ [۱۸] خصوصیات حرارتی بلند مدت یک شمع‌انرژی بتنی پیش‌ساخته با مقاومت بالا را در یک زمین لایه‌ای به صورت آزمون صحرایی و مدل‌سازی عددی بررسی کردند. از نتایج این تحقیق می‌توان به تاثیرات تدریجی خصوصیات ترموفیزیکی زمین به تغییرات دمای بلندمدت خاک اطراف شمع‌انرژی اشاره کرد.

مطالعات متعدد دیگری در حوزه‌ی بررسی رفتار ترموهیدرولیکی و عملکرد حرارتی شمع‌های زمین‌گرمایی انجام شده است که مرتبط‌ترین آن‌ها به موضوع این پژوهش در جدول ۱ گردآوری شده است. اگرچه با

1. Xu et al.
2. Mehraeen et al.
3. You et al.
4. Zhang et al.

5. Darcy's law
6. One dimensional non-isothermal flow

جدول ۱. سایر مطالعات انجام شده در حوزه رفتار ترموهیدرولیکی شمع های انرژی.

Table 1. Other studies conducted on the thermo-hydraulic behavior of energy piles.

موضوع مطالعه	روش تحقیق	سال	محققین
مطالعه اثر جریان آب زیرزمینی و اثرات انتقال حرارت محوری بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی درون گمانه ای	تحلیلی - عددی	۲۰۱۱	مولینا گیرالدو و همکاران ^۱ [۱۹]
بررسی اثر جریان آب زیرزمینی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی مجهز به سیم پیچ مارپیچی	عددی - تحلیلی	۲۰۱۵	ونگ و همکاران ^۲ [۲۰]
بررسی عملکرد حرارتی یک شمع انرژی فلزی در عملکرد سرمایشی و گرمایشی	صحرایی - عددی	۲۰۱۵	گشتی و همکاران ^۳ [۲۱]
تحلیل پارامتری عملکرد حرارتی تک شمع انرژی به روش تفاضل محدود	عددی	۲۰۱۶	قاسمی فرغ و باسو ^۴ [۲۲]
بررسی تبادل حرارت و پاسخ حرارتی زمین به عملکرد شمع انرژی در خاک اشباع و خشک	آزمایشگاهی - عددی	۲۰۱۸	قاسمی فرغ و باسو [۲۳]
اثر مشخصات بتن و گروه شمع بر عملکرد شمع های انرژی بهبود یافته	آزمایشگاهی - عددی	۲۰۱۹	کنگ و همکاران ^۵ [۲۴]
بررسی عملکرد حرارتی گروهی از شمع انرژی دارای لوله U شکل	عددی	۲۰۲۰	لیو و همکاران ^۶ [۲۵]
بررسی عملکرد حرارتی مبدل حرارتی درون گمانه ای در اثر همرفت اجباری و طبیعی	عددی	۲۰۲۱	تیواری و باسو ^۷ [۲۶]
بررسی عملکرد حرارتی شمع زمین گرمایی با بتن مقاومت بالا	صحرایی	۲۰۲۴	گو و همکاران ^۸ [۲۷]
بررسی تاثیر جریان آب زیرزمینی سطحی و همرفت طبیعی بر توان خروجی شمع انرژی	عددی	۲۰۲۴	فتاحیان و همکاران [۲۸]

¹ Molina-Giraldo et al.

² Wang et al.

³ Gashti et al.

⁴ Ghasemi-Fare and Basu

⁵ Kong et al.

⁶ Lyu et al.

⁷ Tiwari and Basu

⁸ Guo et al.

۲-۱- معادلات دیفرانسیلی جزئی همبسته

محیط خاک اشباع را می توان یک محیط متخلخل اشباع در نظر گرفت و جهت بررسی جریان سیال و جریان حرارت در این محیط نیاز است تا معادلات پیوستگی جرم مطابق رابطه (۱)، معادله ی پایستگی تکانه مطابق رابطه (۲) و معادله ی پایستگی انرژی طبق رابطه (۳) به صورت همزمان حل شود [۱۰]. رابطه (۳) برای هر دو نوع محیط متخلخل (خاک) و جامد (بتن) و لوله ی تبادل کننده ی حرارت) معتبر است [۲۶] و اندیس های m و s و f به ترتیب نشان دهنده ی فاز محیط متخلخل، جامد و سیال هستند.

$$n \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho_f g}{K_h} u_f = -\nabla P_f + \rho_f g \quad (2)$$

$$(\rho C_p)_{m,s} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + (\rho C_p)_f u_f \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{m,s} \nabla T) \quad (3)$$

که در این روابط n تخلخل، ρ (kg/m³) چگالی، t (s) زمان، K_h (m/s) نفوذپذیری هیدرولیکی، g (m/s²) شتاب جاذبه ی زمین، C_p (J/kg.K) ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و محیط متخلخل، k (W/m.K) ضریب انتقال حرارت است. T و P به ترتیب نماینده ی سرعت، فشار و دمای مجهول هستند.

برای یک محیط متخلخل اشباع اثر هر دو فاز جامد و مایع در ضریب انتقال حرارت و مقدار (ρC_p) در معادلات ذکر شده به صورت همزمان باید در نظر گرفته شود که این اثر به صورت روابط (۴) و (۵) در معادلات اعمال می شود [۱۰، ۲۱].

$$(\rho C_p)_m = (1-n)(\rho C_p)_s + n(\rho C_p)_f \quad (4)$$

۲-۲- فرضیات تحقیق

اهمیت بالای همرفت طبیعی و همرفت اجباری بر عملکرد حرارتی شمع‌انرژی در تحقیقات پیشین به خوبی نشان داده شده است [۲۶، ۱۰]. به منظور جلوگیری از پیچیدگی مدل عددی و کاهش حجم محاسبات فرض‌های پیش‌رو در این تحقیق در نظر گرفته شده است:

- سطح آب زیرزمینی تا روی سطح زمین در نظر گرفته شده است تا خاک اشباع در نظر گرفته شود.
- سیال درون لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت و میان منافذ ذرات خاک به دلیل تغییرات اندک چگالی تراکم‌ناپذیر تصور شده است.
- تعادل دمایی محلی میان فاز جامد و فاز سیال در خاک وجود دارد.
- خصوصیات حرارتی و هیدرولیکی بتن، هر لایه‌ی خاک و لوله‌ی تبادل‌کننده‌ی حرارت به صورت همسانگرد^۳ و همگن^۴ در نظر گرفته شده است.
- شمع زمین‌گرمایی مورد مطالعه برای یک ساختمان بلند بر روی خاک ضعیف در نظر گرفته شده است.
- با توجه به سرعت پایین جریان آب زیرزمینی، قانون داریسی بر جریان آب زیرزمینی در هر لایه‌ی خاک معتبر است.
- انتقال حرارت بین دو فاز مختلف به طور کامل انجام می‌شود.
- سیال در نظر گرفته در خاک و لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت آب در نظر گرفته شده است.
- تمامی مواد با توجه به تحلیل هیدرولیکی-حرارتی، غیرشکل‌پذیر هستند.

۲-۳- آنالیز حساسیت مقیاس‌شده

خصوصیات حرارتی بتن شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت بازه متفاوتی از مقادیر عددی را در بر می‌گیرند و لازم است به نحوی جهت مقایسه میان آن‌ها یک مقیاس عددی انجام شود. اثر تغییرات خروجی بر تغییرات ورودی در تحقیقات محققین قبلی موجود است. به منظور مقایسه‌ی اثر هر یک از پارامترها بر توان حرارتی شمع از پارامتری به نام ضریب حساسیت مطابق رابطه (۱۰) استفاده می‌شود [۱۴]. این پارامتر رنج تغییرات خروجی و هر ورودی را بر مبنای مقدار اولیه مقیاس می‌نماید و سپس درجه‌ی اهمیت هر یک را در قالب یک عدد بدون بعد ارائه می‌دهد.

$$k_m = (1-n)k_s + nk_f \quad (5)$$

اثر همرفت طبیعی در خاک اشباع به علت تغییرات چگالی سیال به واسطه‌ی تغییرات دما انجام می‌شود و برای در نظر گرفتن این اثر از رابطه‌ی تقریب بوسینسک^۱ همزمان با حل سایر معادلات همبسته استفاده شده است و رابطه‌ی (۶) این معادله را نشان می‌دهد [۳۰، ۱۰].

$$\rho_f = \rho_{f_0} [1 - \beta(T - T_0)] \quad (6)$$

که ρ_{f_0} (kg/m³) چگالی سیال در دمای مرجع T_0 (°C) و β (1/K) ضریب انبساط حرارتی سیال است. برای جریان سیال داخل لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت نیاز است تا معادلات پایستگی جرم، تکانه و انرژی مطابق روابط (۷)، (۸) و (۹) حل شود. رابطه‌ی (۸) اثر افت فشار طولی در لوله را نیز در نظر می‌گیرد [۲۶].

$$\frac{\partial A \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (A \rho_f u_f) = 0 \quad (7)$$

$$\rho_f \frac{\partial u_f}{\partial t} = -\nabla p_f - \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f}{d} |u_f| u_f \quad (8)$$

$$\rho_f A C_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f A C_{p,f} u_f \cdot \nabla T = \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (A k_f \nabla T) + \frac{1}{2} f_D \frac{\rho_f A}{d} |u_f| u_f^2 + Q_{wall}$$

که در این روابط A (m²) سطح مقطع لوله، f_D ضریب اصطکاک داریسی وابسته به عدد رینولدز (Re) جریان، d (m) قطر داخلی لوله و Q_{wall} (W/m) نرخ انتقال حرارت شعاعی بر واحد طول از طریق جداره‌های لوله است [۲۶].

2. Isotropic
3. Homogenous
4. Constant

1. Boussinesq

خطی محدود متحرک^۱ معرفی کردند که اثر جریان آب زیرزمینی و انتقال حرارت محوری در یک مبدا حرارتی درون گمانه‌ای را به صورت سه‌بعدی در نظر می‌گیرد. روش بیان شده به کمک یک مدل‌سازی عددی مبدا حرارتی درون گمانه‌ای به طول ۵۰ m در یک لایه خاک همگن با ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد ۲/۵ W/m.K، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت به مقدار ۸۸۰ J/kg.K، چگالی ذرات جامد ۲۶۵۰ kg/m³ و تخلخل ۰/۲۶ راستی‌آزمایی شد. نتایج بدست آمده منحنی‌های نقاط هم‌دما در خاک اطراف گمانه با نرخ انتقال حرارت ۲۰ W/m هستند که مقیاس‌های میان نتایج روش بیان شده در مقاله و روش مدل منبع حرارتی خطی نامحدود متحرک^۲ انجام می‌دهد. شکل ۳ شماتیک منبع حرارتی مدل‌سازی شده توسط مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹] را نشان می‌دهد.

در این تحقیق به صورت مشابه و مطابق مشخصات مطرح شده در مقاله‌ی مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹] یک مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار [۲۹] COMSOL Multiphysics انجام شد و مقایسه‌ی نتایج بدست آمده توسط مطالعه‌ی حاضر و مطالعه‌ی مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹] در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود انطباق بسیار خوبی میان نتایج مدل عددی مطالعه‌ی حاضر و مطالعه‌ی مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹] وجود دارد و علت اختلاف جزئی نتایج ناشی از تفاوت در روش تحلیل مورد استفاده و پی‌گیری شبکه‌بندی مورد استفاده است.

۳-۲- صحت‌سنجی همرفت طبیعی و خاک لایه‌ای

تیواری و باسو [۲۶] بخشی از مطالعه‌ی عددی خود را بر عملکرد حرارتی یک تبادل‌کننده‌ی حرارتی درون گمانه‌ای در خاک لایه‌ای اشباع با در نظر گرفتن اثر همرفت طبیعی انجام دادند. طول این مبدا حرارتی ۵۰ m و قطر آن ۰/۱۵ m است که حرارتی به اندازه‌ی ۱۲۰ W/m به خاک لایه‌ای اطراف وارد می‌کند. سایر مشخصات مطابق مطالعه‌ی تیواری و باسو [۲۶] در مدل صحت‌سنجی اتخاذ شد. شکل ۵ پروفیل‌های خاک در نظر گرفته شده در تحقیق تیواری و باسو [۲۶] را نشان می‌دهد که در هریک نسبت ضریب انتقال حرارت موثر زمین (K_{eff}) به ضریب انتقال حرارت معادل (K_p) اندازه گرفته شده است. شکل ۶ مقایسه‌ای میان نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه‌ی تیواری و باسو [۲۶] طی مدت زمان هفت روز را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است تطابق خوبی میان نتایج این تحقیق با نتایج مقاله مشاهده می‌شود و حداکثر خطا کمتر از ۷ درصد است که به علت کمی تفاوت

$$S_x = \frac{\frac{\Delta q}{\Delta x}}{x_0} \quad (10)$$

که در این رابطه S_x ضریب حساسیت، q (W/Δm) تغییرات توان انتقال حرارت واحد طول شمع انرژی، q_0 (W/m) توان انتقال حرارت اولیه‌ی واحد طول شمع انرژی، Δx تغییرات پارامتر ورودی، x_0 مقدار اولیه‌ی پارامتر ورودی است. توان انتقال حرارت واحد طول شمع انرژی (q) مطابق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود [۹].

$$q = \frac{C_{p,f} \rho_f Q (T_{in} - T_{out})}{L} \quad (11)$$

که در این رابطه $C_{p,f}$ (J/kg.K) ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت، ρ_f (kg/m³) چگالی سیال، Q (m³/s) دبی سیال ورودی، T_{in} (°C) دمای سیال ورودی، T_{out} (°C) دمای سیال خروجی و L (m) طول شمع زمین گرمایی است.

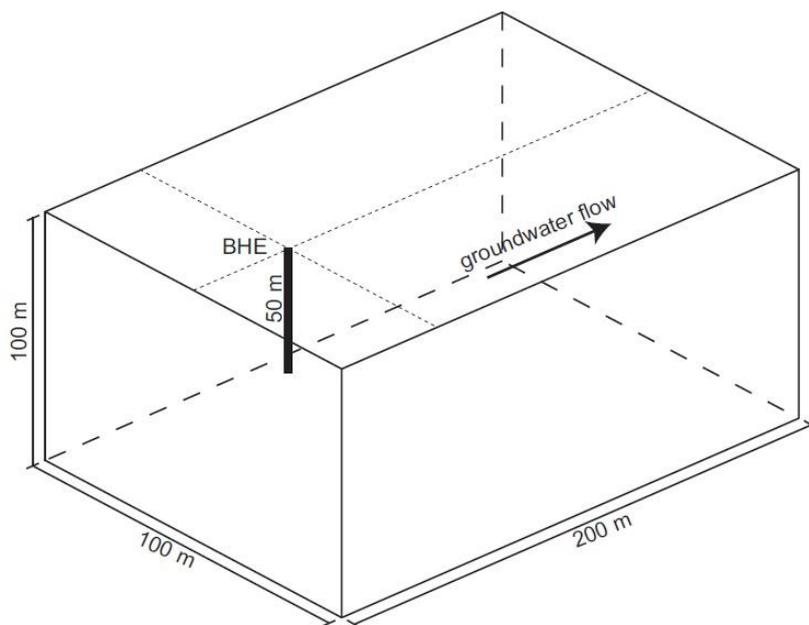
۳-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

به منظور اطمینان از درستی مدل‌سازی عددی، دو صحت‌سنجی انجام شده است. اولین صحت‌سنجی تاییدی بر درستی مدل‌سازی همرفت اجباری و استفاده از قانون جریان داریسی به کمک یک روش تحلیلی - عددی است [۱۹]. صحت‌سنجی دوم جهت اطمینان از درستی مدل‌سازی همرفت طبیعی و لایه‌بندی زمین است که به کمک نتایج یک مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شده است [۲۶]. در تمامی مدل‌ها، ابعاد المان‌های شبکه به اندازه‌ی کافی کوچک انتخاب شده است تا تاثیر آن بر خروجی کمتر از ۱ الی ۲ درصد باشد. لازم بذکر است محدودیت پژوهش‌های منتخب عدم در نظر گرفتن همزمان شرایط خاک لایه‌ای و همرفت ترکیبی بر روی شمع انرژی است که پژوهش حاضر آن را در نظر می‌گیرد.

۳-۱- صحت‌سنجی همرفت اجباری

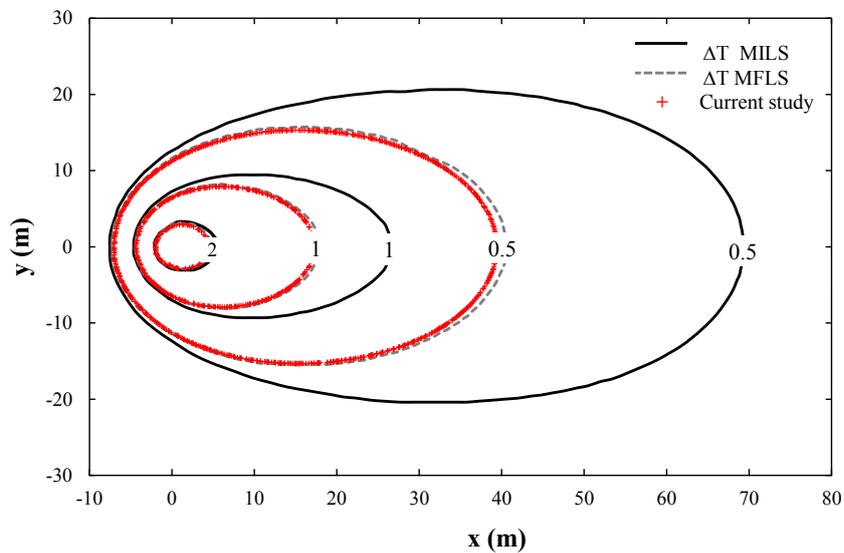
مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹] یک روش تحلیلی به نام مدل منبع

1. Moving finite line source model (MFLS)
2. Moving infinite line source model (MILS)



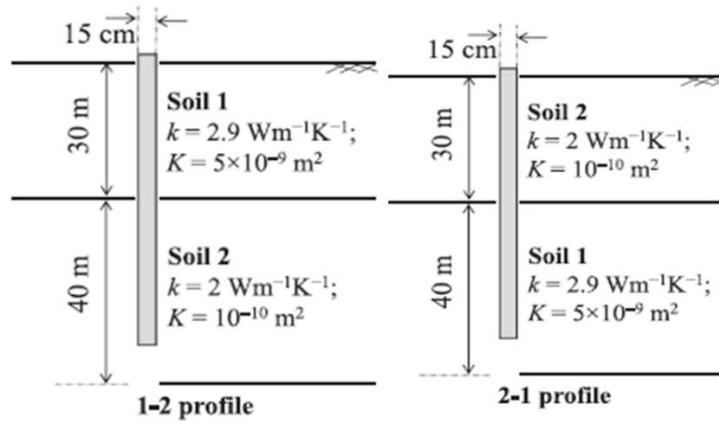
شکل ۳. شماتیک مدل‌سازی عددی مطالعه‌ی مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹].

Fig. 3. Schematic of the numerical modeling in the study by Molina Giraldo et al. [19].



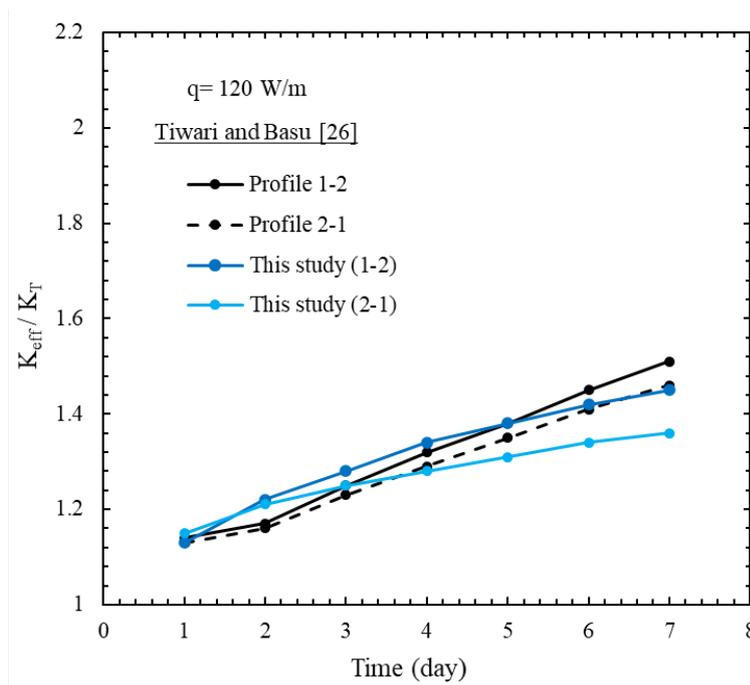
شکل ۴. مقایسه‌ی منحنی‌های هم‌دمای خاک (°C) در وسط گمانه حاصل از نتایج عددی مطالعه‌ی حاضر با روش تحلیلی مولینا گیرالدو و همکاران [۱۹].

Fig. 4. Comparison of soil isotherm curves (°c) at the borehole mid-depth obtained from the present numerical study with the analytical method of Molina Giraldo et al. [19]



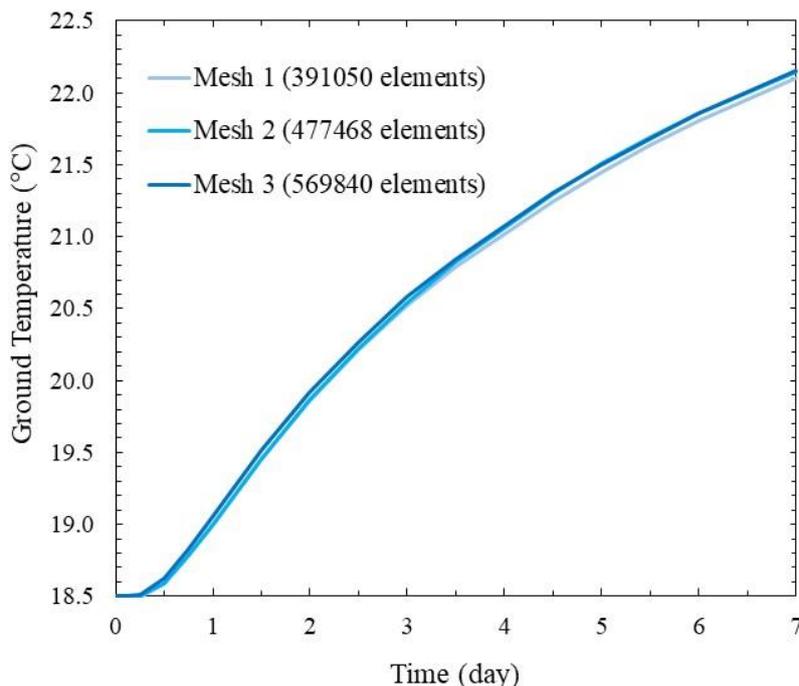
شکل ۵. شماتیک پروفیل‌های خاک متصور شده توسط تیواری و باسو [۲۶].

Fig. 5. Schematic of the soil profiles considered by Tiwari and Basu [26].



شکل ۶. مقایسه‌ی نسبت K_{eff}/k_T در یک خاک لایه‌ای در تحقیق حاضر با تحقیق عددی تیواری و باسو [۲۶].

Fig. 6. Comparison of the K_{eff}/k_T ratio in a layered soil in the present study with the numerical study of Tiwari and Basu [26].



شکل ۷. تحلیل کوچک‌سازی المان‌ها بر اساس پاسخ حرارتی زمین طی هفت روز در میانه‌ی لایه‌ی خاک پایینی.

Fig. 7. Mesh refinement analysis based on ground thermal response over 7 days at the mid-depth of the lower soil layer.

چهاروجهی^۱ و المان‌های سطحی مثلثی برای کل محدوده‌ی مسئله استفاده شد زیرا این نوع المان‌ها نرخ همگرایی بالایی داشته و تعادل مناسبی میان هزینه محاسبات عددی و دقت نتایج ایجاد می‌کنند؛ همچنین استفاده از آن در ادبیات فنی و صحت‌سنجی مدل این مورد را تایید می‌نماید.

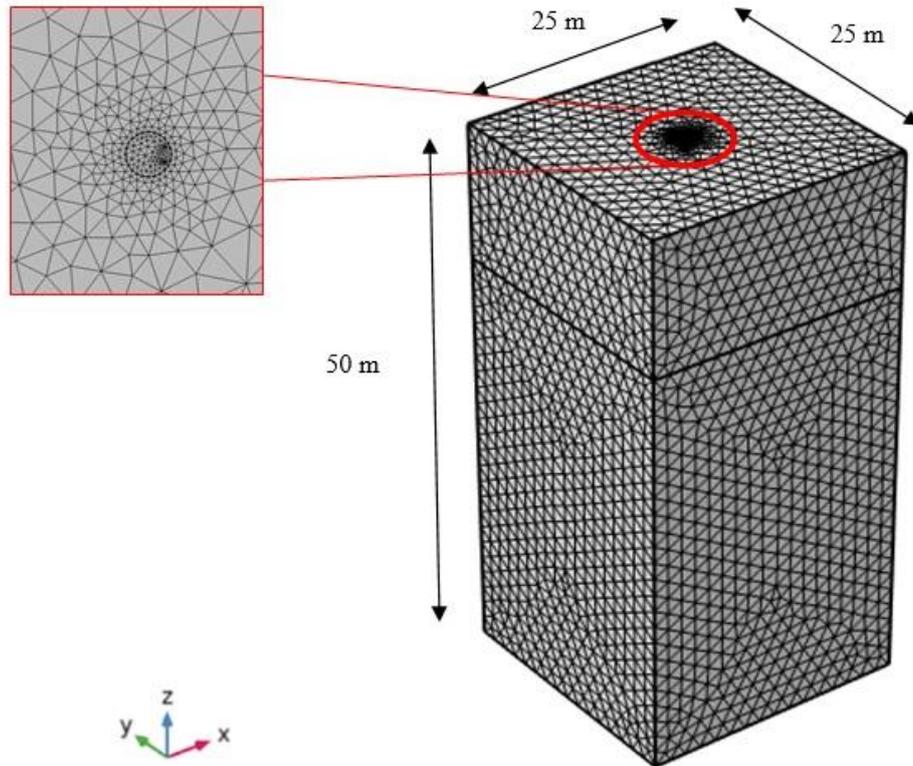
شرایط مرزی متصورشده بر مبنای مرور ادبیات فنی و فرض‌های این تحقیق در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص شده است جریان آب زیرزمینی در یک جهت تا سطح زمین از نیمه‌ی سمت چپ محدوده‌ی مسئله وارد می‌شود و از نیمه‌ی سمت راست آن بدلیل اختلاف ارتفاع هیدرولیکی موجود خارج می‌شود. برای کل سطوح محدوده‌ی مسئله دمای ثابت زمین (T_G) و سطح روی شمع به دلیل اتصال مستقیم با فونداسیون ساختمان به صورت بی‌دررو متصور شد. بدلیل قرارگیری شمع‌انرژی در عمق‌های بالای ۶ m از سطح زمین از تغییرات دمای زمین با عمق صرف نظر شد. همچنین پارامترهای ورودی مدل عددی در جدول ۲ خلاصه شده است.

در شبکه‌بندی و نحوه‌ی تخمین نفوذپذیری معادل است.

۴- مدل‌سازی عددی

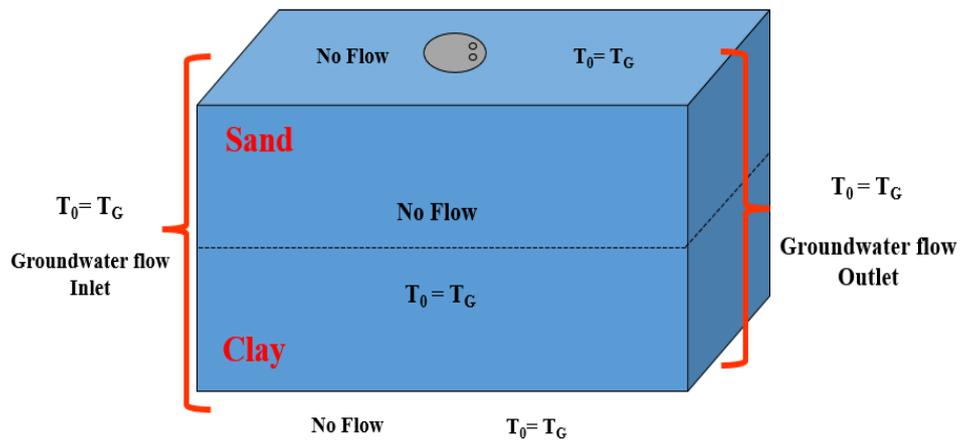
از مدل صحت‌سنجی‌شده جهت بررسی عملکرد حرارتی تک شمع زمین‌گرمایی در خاک لایه‌ای اشباع با در نظر گرفتن همرفت طبیعی و اجباری جهت حل معادلات همبسته هیدرولیکی - حرارتی توسط [۲۹] COMSOL Multiphysics استفاده شد. ابعاد محدوده مدل به روش سعی و خطا به شکلی انتخاب شدند که بر تغییرات دمای خاک و دمای خروجی از شمع‌انرژی اثر نگذارند و یک تحلیل شبکه برای سه حالت المان متوسط، المان کوچک و المان خیلی کوچک انجام گرفت و در نهایت با توجه به نزدیکی پاسخ‌های حرارتی زمین، المان شماره ۲ انتخاب شد تا هم از نظر سنگینی محاسبات و هم از نظر دقت حل مناسب باشد. شکل ۷ نتایج آنالیز شبکه‌بندی برای تغییرات دمای خاک در اطراف شمع‌انرژی (وسط لایه‌ی پایینی خاک) طی هفت روز و شکل ۸ شبکه‌بندی انجام گرفته روی مدل را نشان می‌دهد. لازم بذکر است جهت شبکه‌بندی مدل از المان‌های حجمی

1. Tetrahedral



شکل ۸. شبکه‌بندی نهایی مدل‌سازی عددی.

Fig. 8. Final mesh of the numerical model.



شکل ۹. شرایط مرزی مدل‌سازی عددی.

Fig. 9. Boundary conditions of the numerical model

جدول ۲. پارامترهای ورودی مدل عددی.

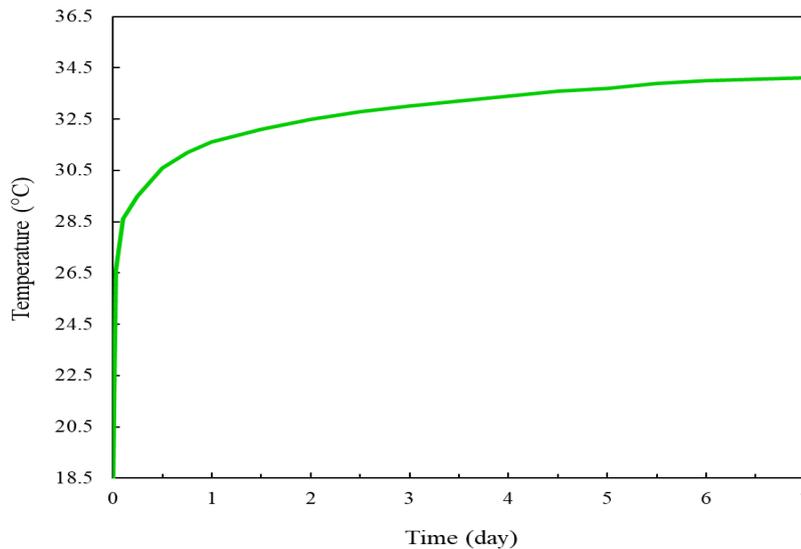
Table 2. Input parameters of the numerical model.

مقدار	واحد	نام پارامتر
<u>مشخصات هندسی</u>		
۲۵×۲۵×۵۰	m	محدوده مسئله
۲۵	m	طول شمع
۰/۶	m	قطر شمع
۲۴/۹۵	m	عمق قرارگیری لوله
۲۵	mm	قطر داخلی لوله
۳/۵	mm	ضخامت جداره‌ی لوله
<u>مشخصات حرارتی</u>		
۲۸۶۰	kg/m ³	چگالی ذرات جامد رس
۱/۱	W/m.K	ضریب انتقال حرارت موثر رس
۹۰۰	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه رس
۲۶۶۰	kg/m ³	چگالی ذرات جامد ماسه
۲/۴	W/m.K	ضریب انتقال حرارت موثر ماسه
۸۸۰	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه ماسه
۹۵۰	kg/m ³	چگالی لوله‌ی پلی اتیلنی
۰/۴۲	W/m.K	ضریب انتقال حرارت لوله‌ی پلی اتیلنی
۲۲۵۰	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه لوله‌ی پلی اتیلنی
COMSOL [۲۹]	kg/m ³	چگالی آب
COMSOL [۲۹]	W/m.K	ضریب انتقال حرارت آب
COMSOL [۲۹]	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه آب
<u>مشخصات هیدرولیکی</u>		
۰/۵۵	-	تخلخل رس
۹-۱۰	m/s	نفوذپذیری رس
۰/۴۵	-	تخلخل ماسه
۵-۱۰	m/s	نفوذپذیری ماسه
<u>مشخصات فنی</u>		
تغییرات مطابق شکل ۱۰	°C	دمای سیال ورودی
۱۸/۵	°C	دمای اولیه‌ی زمین
۰/۳۵	m ³ /h	دبی ورودی
مطابق ضرایب نفوذپذیری	m/s	سرعت جریان آب زیرزمینی

۵- نتایج

۸۳۷ kg.K برای بتن معمولی، مقادیر ضریب هدایت حرارتی W/m.K و ۲/۴ و ۳/۶ W/m.K برای بتن اصلاح‌شده (مانند اضافه‌شدن گرافیت به طرح اختلاط [۲۴]) یا مقاومت بالا و مقادیر ظرفیت گرمایی ویژه J/kg.K و ۱۵۰۰ و ۲۲۰۰ J/kg.K برای بتن‌های مرطوب یا بتن‌های قرار گرفته در محیط‌های گرم انتخاب شدند [۳۱] تا مجموعه جامعی از بتن‌های مصرفی تحت شرایط دمایی و محیطی متفاوت را شامل شود.

یک تحلیل پارامتری بر روی پارامترهای بتن مصرفی در شمع‌انرژی انجام شد. پارامترهای مورد مطالعه شامل چگالی جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت بتن هستند که بر اساس مرور متون فنی انجام‌شده مقادیر واقعی از تغییرات این پارامترها در جدول ۳ گردآوری شده است. مقادیر ضریب رسانایی حرارتی W/m.K و ۱/۶ و ظرفیت گرمایی ویژه J/



شکل ۱۰. تغییرات دمای سیال ورودی به سیستم شمع انرژی با زمان.

Fig. 10. Variation of the fluid temperature entering the energy pile system over time.

جدول ۳. محدوده‌ی تغییرات پارامترهای حرارتی بتن برای انجام تحلیل پارامتری.

Table 3. Range of concrete thermal parameters for performing parametric analysis.

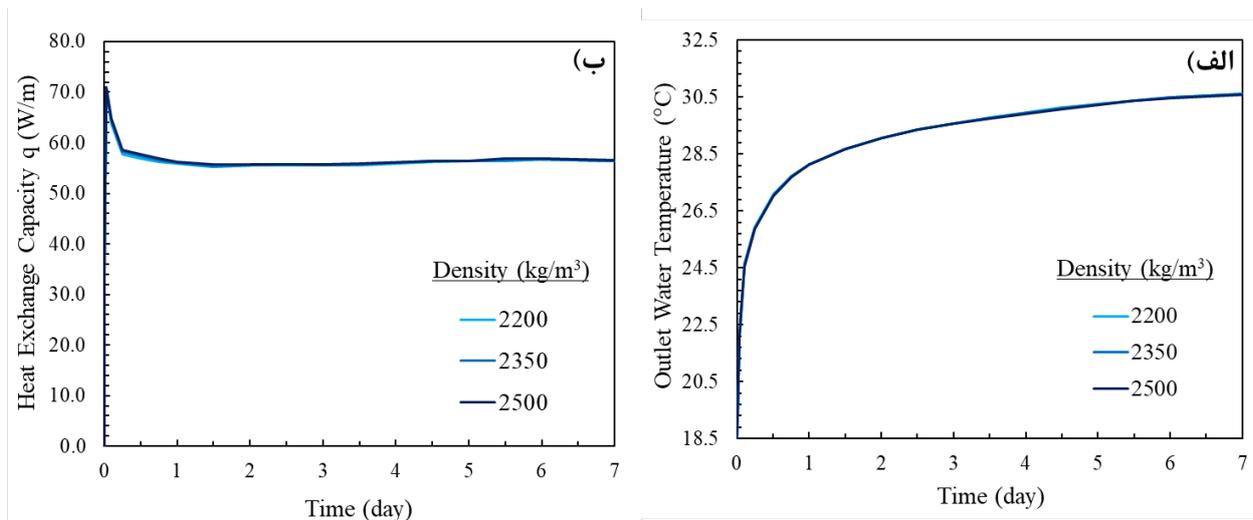
مقادیر	واحد	پارامتر
۲۵۰۰-۲۳۵۰-۲۲۰۰	kg/m ³	چگالی [۳۱, ۲۱]
۱/۲-۶/۳-۴/۶	W/m.K	ضریب انتقال حرارت [۳۱, ۲۴, ۲۱]
۲۲۰۰-۱۵۰۰-۸۳۷	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه [۳۲, ۳۱, ۲۱]

لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت و شکل ۱۱- ب همان تغییرات را بر توان خروجی واحد طول شمع انرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات دمای سیال خروجی روندی مشابه تغییرات دمای ورودی آن سیال دارد و در ابتدا اختلاف این دو دما بسیار کوچک است و سپس تا $3/5^{\circ}\text{C}$ افزایش می‌یابد تا در انتهای هفت روز تقریباً در این مقدار ثابت شود که با فیزیک مسئله سازگار است زیرا در زمان $t = 0\text{s}$ دمای سیال ورودی با دمای زمین برابر بوده و طی مدت زمان کوتاهی این اختلاف زیاد می‌شود تا دما در حدود $34/1^{\circ}\text{C}$ ثابت شود و مدتی طول می‌کشد تا تعادل حرارتی بین سیال تبادل‌کننده‌ی حرارت و محیط اطراف برقرار شود. افزایش دمای سیال ورودی از $18/5^{\circ}\text{C}$ تا $34/1^{\circ}\text{C}$ همزمان سبب گرم‌شدن زمین اطراف

مطالعه حاضر پارامتری اثر همرفت طبیعی، همرفت اجباری و خاک لایه‌ای را در یک تحلیل وابسته به زمان کوتاه‌مدت به مدت هفت روز و در یک فرایند خنک‌شوندگی^۱ سیال به صورت همزمان بر ظرفیت توان خروجی از سیستم شمع انرژی و دمای خروجی سیال از لوله‌های تبادل‌کننده‌ی حرارت لحاظ می‌کند. تعداد مدل‌های عددی جهت تحلیل شامل ۱ مدل مرجع و ۹ مدل عددی است که تغییرات هر پارامتر حرارتی بتن (چگالی جرمی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت) در سه مقدار ابتدایی، میانی و انتهایی بازه توسط آن بررسی می‌شود.

شکل ۱۱- الف اثر تغییرات چگالی بتن بر دمای سیال خروجی از

1. Cooling operation



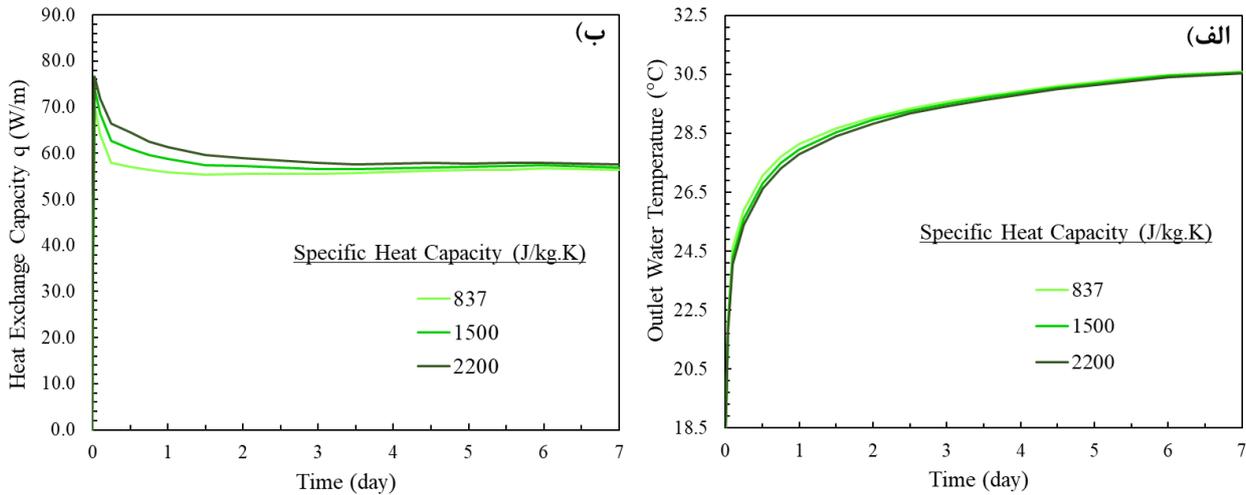
شکل ۱۱. اثر تغییرات چگالی بتن با زمان: (الف) بر دمای سیال خروجی (ب) بر توان خروجی واحد طول سیستم شمع انرژی.

Fig. 11. Effect of concrete density variation over time: (a) on fluid outlet temperature (b) on output power per unit length of the energy pile.

شکل ۱۲- الف و ۱۲- ب به ترتیب اثر پارامتر ظرفیت گرمایی ویژه بتن را بر دمای سیال خروجی و توان حرارتی واحد طول شمع انرژی نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است تغییرات روند هر دو نمودار مطابق با توضیحات شکل ۱۱ است و تفاوت قابل توجه آن تاثیر پارامتر ظرفیت گرمایی ویژه بر دمای خروجی و توان تولیدشده توسط شمع انرژی است. هرچه ظرفیت گرمایی ویژه مقدار بیشتری باشد نشان‌دهنده آن است که با صرف انرژی گرمایی بیشتری دمای ۱ kg بتن به اندازه ۱°C افزایش می‌یابد. افزایش دمای بتن سبب گرم شدن محیط اطراف سیال تبادل‌کننده حرارت و در نتیجه افت توان حرارتی تا حدود ۲۰٪ و افزایش دمای سیال خروجی به میزان ۸/۵°C از شمع انرژی می‌شود بنابراین در مقادیر کمتر ظرفیت گرمایی ویژه انتظار می‌رود مقدار بالارفتن دمای بتن در یک بازه زمانی مشخص بیشتر باشد و در نتیجه افت توان حرارتی بیشتری مشاهده شود که همین اتفاق در شکل ۱۲- ب مشاهده می‌شود و در زمان دلخواه t بتنی با ظرفیت گرمایی ویژه $C_p = 2200 \text{ J/kg.K}$ توان حرارتی ۲/۰۲٪ بیشتر نسبت به بتنی با $C_p = 837 \text{ J/kg.K}$ دارد و علت این نتیجه نیز در شکل ۱۲- الف مطابق توضیحات ارائه شده مشاهده می‌شود. با وجود تاثیر مثبت افزایش کمیت ظرفیت گرمایی ویژه به مقدار 1363 J/kg.K بر توان خروجی واحد طول شمع زمین گرمایی به میزان ۲/۰۲٪، این افزایش توان مقدار بزرگی نیست زیرا پارامترهای ظرفیت گرمایی ویژه سایر مصالح مانند

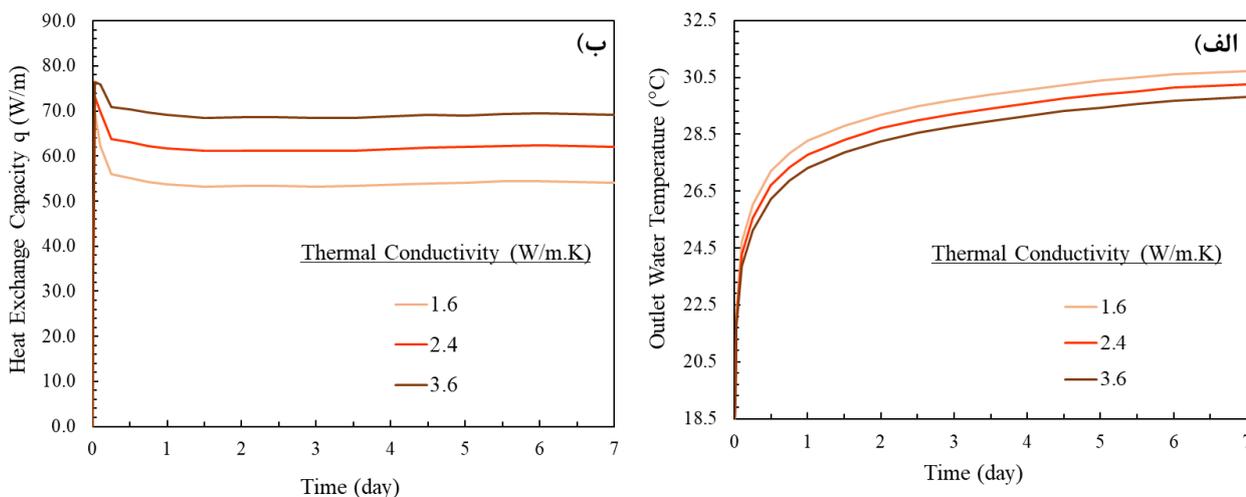
شمع انرژی و اختلاف دما با دمای سیال خروجی می‌شود اما به تدریج با ثبات دمای ورودی و گرم شدن زمین تا رسیدن به یک تعادل حرارتی پایدار، این پدیده سبب افت سرعت فرایند انتقال حرارت و افت سرعت کاهش دمای سیال خروجی می‌شود که در کاهش توان خروجی از شمع انرژی به میزان ۱۹/۶٪ اثر دارد. توان خروجی از شمع در ابتدا تا $70/17 \text{ W/m}$ افزایش و سپس تا حدود $56/4 \text{ W/m}$ کاهش می‌یابد که علت آن افزایش دمای سیال ورودی و اختلاف دمای بالا با زمین اطراف در همان ساعات اولیه است و این سبب گرم شدن سریع زمین اطراف شمع و افت اولیه توان انتقال حرارت شمع می‌شود اما به تدریج با رسیدن دمای سیال ورودی به یک حد ثابت $34/1^\circ\text{C}$ و کاهش سرعت افزایش دما، توان خروجی نیز تقریباً به یک ثبات مشخص به مقدار $56/4 \text{ W/m}$ می‌رسد و این روند متناظر با روند تغییرات دمای خروجی سیال از لوله‌های تبادل‌کننده حرارت است.

نکته مهم دیگری که در شکل ۱۱- الف و ۱۱- ب مشاهده می‌شود اثر قابل اغماض چگالی بتن‌های مصرفی رایج بر توان خروجی واحد طول شمع و دمای سیال خروجی است که نشان می‌دهد پارامتر چگالی بتن در عملکرد حرارتی یک شمع زمین گرمایی طی شرایط خاک لایه‌ای و همرفت ترکیبی تاثیر قابل توجهی ندارد که علت آن تغییرات محدود و کوچک بازه چگالی، نقش مهم‌تر ضریب رسانایی حرارتی بتن و اینکه افزایش چگالی از دیدگاه فیزیکی بیشتر به ذخیره انرژی گرمایی تا تبادل آن اثر می‌گذارد، است.



شکل ۱۲. اثر تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه با زمان: (الف) بر دمای سیال خروجی (ب) بر توان خروجی واحد طول سیستم شمع انرژی.

Fig. 12. Effect of specific heat capacity variation over time: (a) on fluid outlet temperature (b) on output power per unit length of the energy pile.



شکل ۱۳. اثر تغییرات ضریب انتقال حرارت با زمان: (الف) بر دمای سیال خروجی (ب) بر توان خروجی واحد طول سیستم شمع انرژی.

Fig. 13. Effect of thermal conductivity variation over time: (a) on fluid outlet temperature (b) on output power per unit length of the energy pile system.

شمع انرژی نشان می‌دهد. با مشاهده تغییرات دمای خروجی و توان خروجی با افزایش ضریب انتقال حرارت از $1/6$ W/m تا $3/6$ W/m، تأثیر بیشتری (۲۸٪ افزایش نرخ تبادل حرارت) در مقایسه با پارامترهای ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی مشاهده می‌شود که علت آن اثر مستقیم این پارامتر بر نرخ تبادل حرارت میان سیستم شمع انرژی

لوله‌ی تبادل‌کننده‌ی حرارت و خاک هم اثر مشخص خود را دارند و این پارامتر بیشتر بر افزایش ظرفیت نگهداری انرژی حرارتی در مصالح تا نرخ تبادل حرارت اثر می‌گذارد.

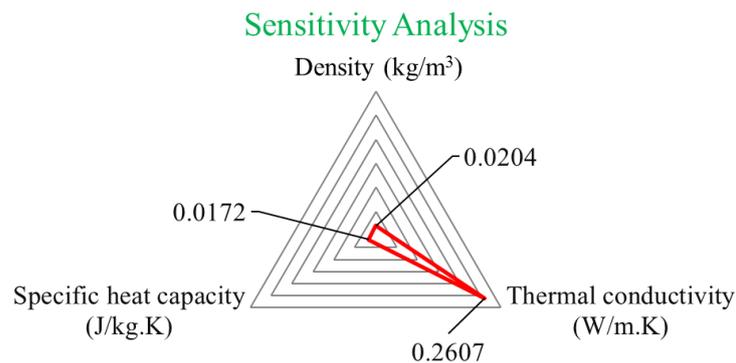
شکل ۱۳- الف و ۱۳- ب تأثیر پارامتر ضریب انتقال حرارت را به ترتیب بر دمای خروجی سیستم شمع انرژی و توان تولیدشده بر واحد طول

بین محدوده‌ی 46 W/m الی 66 W/m برآورد نمودند و در نهایت در پژوهش گو و همکاران [۲۷] نیز در یک تست صحرایی عملکرد حرارتی روی یک شمع‌انرژی به طول 15 m و قطر 0.4 m بین 61.9 W/m تا 61.9 W/m بدست آمد. روند تغییرات و مقادیر نرخ تبادل حرارت در این پژوهش و پژوهش‌های مذکور همه در بازه‌ی 50 W/m الی 90 W/m قرار دارد که نشان از سازگاری نتایج دارد و علت اختلافات عددی، تفاوت در شرایط هندسی نظیر طول و قطر شمع‌انرژی، پارامترهای متفاوت مصالح و وجود یا عدم وجود جریان آب زیرزمینی است که سبب تفاوت بین 8% الی 27% در توان تبادل حرارت می‌شود.

با توجه به محدوده اعداد و تغییرات متفاوت هر یک از پارامترهای حرارتی بتن به منظور بررسی و مقایسه‌ی اثر دقیق هر یک بر توان خروجی شمع زمین‌گرمایی یک تحلیل حساسیت با توجه به رابطه (۱۰) انجام شد. این رابطه به کمک مقادیر اولیه‌ی هر یک از پارامترهای مورد مطالعه، آن‌ها را جهت مقایسه مقیاس می‌نماید و عددی بدون بعد ارائه می‌دهد که تاثیر واحد هر پارامتر را بر خروجی از بین می‌برد و به این ترتیب مقایسه‌ی دقیق‌تری میان این پارامترها انجام می‌گیرد. نتایج این تحلیل حساسیت و محاسبه‌ی ضریب حساسیت (S_x) برای هر پارامتر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود مقدار ضریب حساسیت برای هر یک از پارامترهای چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت بتن مصرفی به ترتیب برابر با 0.0204 ، 0.0172 و 0.2607 بدست آمده است و بر این اساس با اهمیت‌ترین پارامتر، ضریب انتقال حرارت بتن معرفی

و محیط اطراف است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان 2 W/m ، دمای نهایی سیال خروجی حدود $3/2\%$ کاهش یافته و توان خروجی 28% افزایش می‌یابد. روند تغییرات دو نمودار مطابق با توضیحات شکل ۱۱ است اما علت اختلاف مقادیر را می‌توان در مفهوم ضریب انتقال حرارت که بیانگر سرعت انتقال گرما در واحد طول به ازای افزایش 1°C است جستجو نمود. با افزایش این ضریب فرایند تبادل حرارت سریع‌تر انجام می‌شود، در نتیجه دمای سیال خروجی با افزایش این ضریب با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و این سبب افزایش توان و بازدهی شمع زمین‌گرمایی در مدت زمان کوتاه‌تر می‌شود و می‌توان به عنوان یک پارامتر موثر جهت تعیین طرح اختلاط بتن مصرفی مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهش کنگ و همکاران [۲۴] مطالعه‌ای بر روی ضریب رسانایی حرارتی بتن تبادل‌کننده‌ی حرارت از $1/6 \text{ W/m.K}$ تا $2/4 \text{ W/m.K}$ انجام گرفت و بدست آمد توان حرارتی بین محدوده‌ی 60 W/m الی 60 W/m به ثبات می‌رسد، در پژوهش حاضر نیز مطابق شکل ۱۳- الف به ازای تغییر ضریب هدایت حرارتی بتن از $1/6 \text{ W/m.K}$ تا $2/4 \text{ W/m.K}$ تحت شرایط ذکرشده، نرخ تبادل حرارت شمع بین 50 W/m الی 70 W/m به ثبات می‌رسد که این مقادیر با یکدیگر با توجه به تفاوت در نوع لایه‌های خاک و شرایط مرزی دو پژوهش سازگار است. ژو و همکاران [۱۶] نرخ تبادل حرارت یک شمع‌انرژی به طول 28 m و قطر 0.6 m با بتنی به ضریب هدایت حرارتی $1/628 \text{ W/m.K}$ ، ظرفیت گرمایی ویژه J/kg.K و چگالی جرمی 2500 kg/m^3 را طی یک پژوهش صحرایی-عددی



شکل ۱۴. نتایج تحلیل حساسیت و محاسبه‌ی ضریب حساسیت (S_x) بر روی پارامترهای حرارتی بتن.

Fig. 14. Results of sensitivity analysis and calculation of the sensitivity coefficient (S_x) for concrete thermal parameters.

شمع انرژی، ضریب انتقال حرارت با ضریب حساسیت ۰/۲۶۰۷ است بنابراین در انتخاب طرح اختلاط بتن مصرفی شمع جهت افزایش توان حرارتی سیستم این پارامتر نسبت به چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه اولویت دارد.

• بتن‌های مقاومت بالا یا تقویت‌شده با گرافیت گزینه‌های مناسبی جهت بهبود عملکرد حرارتی شمع انرژی هستند.

تمرکز پژوهش انجام‌شده بر بررسی عملکرد حرارتی کوتاه‌مدت شمع‌های زمین‌گرمایی تحت تاثیر پارامترهای حرارتی بتن مصرفی است و بررسی اثر عامل زمان به عنوان پارامتر ورودی در میان‌مدت و بلندمدت در کنار بررسی پارامترهای حرارتی سایر مصالح و پروفیل سرعت‌های متفاوت جریان آب زیرزمینی از محدودیت‌های این پژوهش است که زمینه مطالعات آینده را فراهم می‌آورد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، $J/kg.m$
d	قطر داخلی لوله‌ی تبادل کننده‌ی حرارت، m
f_D	ضریب اصطکاک داری
g	شتاب جاذبه‌ی زمین، m/s^2
k	ضریب انتقال حرارت، $W/m.K$
k_{eff}	ضریب انتقال حرارت موثر، $W/m.K$
K_h	ضریب هدایت هیدرولیکی، m/s
k_T	ضریب انتقال حرارت معادل، $W/m.K$
L	طول شمع زمین‌گرمایی، m
n	تخلخل
P	فشار، Pa
q	ظرفیت انتقال حرارت واحد طول، W/m
q_0	ظرفیت انتقال حرارت واحد طول اولیه، W/m
Q	دبی سیال ورودی، m^3/s
Q_{wall}	نرخ تبادل حرارت شعاعی جداره‌ی لوله بر واحد طول، W/m
Re	عدد رینولدز
S_x	ضریب حساسیت
t	زمان، s
T	دما، $^{\circ}C$

می‌شود. بنابراین به منظور ایجاد یک طرح اختلاط مناسب جهت افزایش توان حرارتی یک شمع زمین‌گرمایی نیاز است از بتنی استفاده شود که در ابتدا ضریب انتقال حرارت بالاتر و سپس به ترتیب چگالی وزنی و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتری داشته باشند که این موارد می‌تواند بر اساس مقادیر نسبت آب به سیمان، نوع شن و ماسه مصرفی و یا افزودنی‌های بتن کنترل شود و معمولاً بتن‌های مقاومت بالا و یا اصلاح‌شده با گرافیت این ویژگی را دارند. اگرچه در پروژه‌های مختلف با شرایط هندسی و هیدرولیکی متفاوت از این پژوهش مقادیر عددی این ضرایب تغییر خواهد کرد اما با توجه به اهمیت بسیار بالای پارامتر ضریب انتقال حرارت نسبت به دو پارامتر دیگر و تایید این موضوع طبق مقایسه انجام‌شده با نتایج سایر پژوهش‌ها مشخص می‌شود همواره این پارامتر تعیین‌کننده نهایی خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مطالعه‌ی عددی - پارامتری در خصوص تاثیر پارامترهای حرارتی بتن شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال حرارت بر عملکرد حرارتی یک شمع زمین‌گرمایی با تاکید بر رفتار هیدرولیکی - حرارتی آن تحت شرایط همرفت طبیعی، همرفت اجباری و خاک لایه‌ای به کمک نرم‌افزار اجزای محدود [۲۹]-COMSOL Multi-physics طی هفت روز و در نظر گرفتن فرایند سرمایش انجام شد. مدل عددی با مطالعات تحلیلی و عددی پژوهش‌های قبلی صحت‌سنجی شد و با استفاده از یک پارامتر بی‌بعد تحت عنوان ضریب حساسیت، اهمیت هر یک از پارامترها جهت انتخاب نوع افزودنی‌ها و طرح اختلاط مصالح بتن مصرفی برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی شمع‌های زمین‌گرمایی مشخص شد. نتایج و نتیجه‌گیری‌های حاصل از این پژوهش در ادامه آمده است:

- سرعت کاهش دمای سیال خروجی از لوله‌ی تبادل‌کننده‌ی حرارت در ساعات اولیه عملکرد بالا است اما پس از گذشت این مدت کاهش می‌یابد تا با ثبات دمای خروجی در محدوده‌ی $28/8^{\circ}C$ الی $30/7^{\circ}C$ و برقراری تعادل حرارتی بین سیستم شمع محیط اطراف به حد تعادل برسد.
- نرخ تبادل حرارت نهایی شمع انرژی به ازای تغییرات چگالی جرمی (kg/m^3) از 2200 تا 2500 ، ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$) از 837 تا 2200 و ضریب رسانایی حرارتی بتن ($W/m.K$) از $1/6$ تا $3/6$ به ترتیب $0/3\%$ ، $2/0\%$ و 28% افزایش می‌یابد.
- در بین پارامترهای حرارتی بتن، موثرترین پارامتر بر توان حرارتی

- [6] Q.I. Alqawasmeh, M.J. Kreitmair, G.A. Narsilio, The role of ground hydrothermal spatial variability on energy pile group thermal performance, *Computers and Geotechnics*, 179 (2025) 106983.
- [7] 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.
- [8] H. Sadeghi, R.M. Singh, Driven precast concrete geothermal energy piles: Current state of knowledge, *Building and Environment*, 228 (2023) 109790.
- [9] 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) 110748.
- [10] 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.
- [11] 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 for Energy and the Environment*, 38 (2024) 100538.
- [12] Y. Man, H. Yang, N. Diao, J. Liu, Z. Fang, A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13-14) (2010) 2593-2601.
- [13] A.K. Tiwari, P. Basu, Thermal interaction between a group of geothermal piles in the presence of natural convection, *Journal of Building Engineering*, 82 (2024) 108360.
- [14] H. Liu, F. He, C. Wang, A. Bouazza, G. Kong, Z. Sun, Heat transfer performance of energy pile and borehole heat exchanger: A comparative study, *Journal of Building Engineering*, 97 (2024) 110721.
- [15] O. Ghasemi-Fare, P. Basu, Coupling heat and buoyant fluid flow for thermal performance assessment of geothermal piles, *Computers and Geotechnics*, 116 (2019) 103211.

T_G دمای اولیه‌ی زمین، °C

T_{in} دمای سیال ورودی، °C

T_{out} دمای سیال خروجی، °C

u سرعت جریان، m/s

علائم یونانی

β ضریب انبساط حرارتی، 1/K

ρ چگالی، kg/m³

زیرنویس

f سیال

m متخلخل

s جامد

منابع

- [1] M. De Moel, P.M. Bach, A. Bouazza, R.M. Singh, J.O. Sun, Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9) (2010) 2683-2696.
- [2] Z. Mohamad, F. Fardoun, F. Meftah, A review on energy piles design, evaluation, and optimization, *Journal of Cleaner Production*, 292 (2021) 125802.
- [3] M.R. Akbarzadeh, B. Naeim, A. Asgari, H.E. Estekanchi, Framework for multi-hazard parameterized fragility based uncertainty quantification and sensitivity analysis of offshore wind turbines, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 201 (2026).
- [4] A. Asgari, S.F. Ahmatabar Sorkhi, Wind turbine performance under multi-hazard loads: wave, wind, and earthquake effects on liquefiable soil, *Results in Engineering*, 26 (2025).
- [5] F. Azizi Zade, F. Azizi Zade, M.M. Ghafurian, A. Arabkoohsar, Solar-ground synergies for sustainable energy: A critical review of ground material performance and applications in solar energy, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 296 (2026) 114021.

- heat transfer characteristics and pile group influence of enhanced heat transfer energy piles, *Journal of Building Engineering*, 24 (2019) 100768.
- [25] W. Lyu, H. Pu, J. Chen, Thermal performance of an energy pile group with a deeply penetrating U-shaped heat exchanger, *Energies*, 13(21) (2020) 5822.
- [26] A.K. Tiwari, P. Basu, Interpretation of TRT data in the presence of natural convection and groundwater flow in saturated ground, *Computers and Geotechnics*, 140 (2021) 104426.
- [27] Y. Guo, C. Wang, A. Bouazza, H. Chang, G. Kong, Thermal performance of a full-scale pre-tensioned high strength concrete (PHC) energy pile, *Journal of Energy Storage*, 98 (2024) 112840.
- [28] 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 Journal of Civil Engineering*, 56(5) (2024) 629-650. (In Persian)
- [29] COMSOL Multiphysics® v. 6.1. www.comsol.com. COMSOL AB, Sweden., in.
- [30] D.A. Nield, A. Bejan, D.A. Nield, A. Bejan, Heat transfer through a porous medium, *Convection in porous media*, (2017) 37-55.
- [31] M. Malik, S. Bhattacharyya, S.V. Barai, Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review, *Construction and Building Materials*, 270 (2021) 121398.
- [32] J. Gao, X. Zhang, J. Liu, K.S. Li, J. Yang, Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study, *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18) (2008) 2295-2304.
- [16] B. Xu, H. Zhang, Z. Chen, Study on heat transfer performance of geothermal pile-foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 147 (2020) 119020.
- [17] 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 and buildings*, 155 (2017) 249-259.
- [18] G. Zhang, Z. Cao, Y. Liu, J. Chen, Field test and numerical simulation on the long-term thermal response of PHC energy pile in layered foundation, *Sensors*, 21(11) (2021) 3873.
- [19] N. Molina-Giraldo, P. Blum, K. Zhu, P. Bayer, Z. Fang, A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection, *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12) (2011) 2506-2513.
- [20] D. Wang, L. Lu, W. Zhang, P. Cui, Numerical and analytical analysis of groundwater influence on the pile geothermal heat exchanger with cast-in spiral coils, *Applied energy*, 160 (2015) 705-714.
- [21] E.H.N. Gashti, V.-M. Uotinen, K. Kujala, Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study, *Energy and buildings*, 69 (2014) 165-174.
- [22] O. Ghasemi-Fare, P. Basu, Predictive assessment of heat exchange performance of geothermal piles, *Renewable energy*, 86 (2016) 1178-1196.
- [23] 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.
- [24] L.-p. Kong, L. Qiao, Y.-y. Xiao, Q.-w. Li, A study on

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Azizi Zade , M. M. Ahmadi, *Investigation of the Effects of Concrete's Thermal Characteristics on the Thermal Performance of Geothermal Piles Considering Mixed Convection*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(11) (2026) 1939-1960.

DOI: [10.22060/ceej.2026.23769.8212](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.23769.8212)

