

Numerical modeling and analysis of the effect of different parameters on the efficiency and thermal performance of energy piles

Mohammad Hossein Sobhdam, Mohammad Mehdi Ahmadi *

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

ABSTRACT: In recent years, with the growth of industrial societies, the amount of energy consumption in the world has been increasing. On the other hand, the most consumed energy sources in the world are non-renewable energy sources. For this reason, governments and industries have invested in facilitating and making renewable energy sources cheaper. One of these renewable energies is geothermal energy, which is one of the most economical ways to use this energy, using heat exchange systems in piles and foundations. Various construction methods have been used to implement energy piles, and many parameters are involved in their design. In this research, the effect of each of these parameters on the thermal performance of the energy pile is investigated using 3D numerical modeling and using the finite element method with COMSOL. Flow rate, pile length, pipe diameter and thickness, and center-to-center distance of pipes are the parameters that have been investigated in this research. Also, by using the Taguchi method, the effect of important parameters on the output power of the energy pile, in the short and long term, was compared and ranked. The obtained results have shown that reducing the flow rate, increasing the length of the pile, and reducing the diameter and thickness of the pipe improve the thermal performance of the energy pile. In addition, pipe configuration, pile length, and the distance from the center to the center of the pipes compared to other parameters, are the most important parameters affecting the output power of the energy pile.

Review History:

Received: Aug. 30, 2023
Revised: Aug. 27, 2024
Accepted: Jun. 25, 2025
Available Online: Jul. 03, 2025

Keywords:

Geothermal Energy
Energy Pile
Thermal Performance
Numerical Modeling
Taguchi Method

1- Introduction

The growing global focus on renewable energy has elevated interest in energy piles. According to the IPCC, the Earth's surface temperature has risen by about 1.5°C since pre-industrial times, largely due to excessive greenhouse gas emissions [1]. Building heating systems are significant contributors, emitting over 2250 megatons of CO₂ annually, as reported by the IEA [2]. Heating and cooling systems based on renewable sources can play a pivotal role in reducing these emissions. Ground Source Heat Pumps (GSHPs) are a promising solution in this context. Energy piles, a type of GSHP, offer a dual function: structural support and thermal energy exchange with the ground. Their dual functionality makes them particularly attractive [3]. While promising, energy pile design lacks a comprehensive standard for integrating thermal and mechanical behavior, leading to reliance on empirical models [4].

Several experimental and numerical studies have been conducted. Research shows that heating induces compressive stress and thermal expansion in piles. The radial nature of heat transfer, rapid thermal stabilization, and thermal resistance are key performance aspects. Studies further reveal that soil thermal conductivity and flow regime significantly

affect performance, while pile material conductivity is less impactful. 3D numerical models emphasize the importance of pipe surface area, pile length, and pipe arrangement (e.g., U-shape, W-shape, helical, and so on) [5, 6].

Groundwater flow plays a crucial role, with even small flows enhancing heat exchange, especially in colder seasons. Pipe configuration also affects thermal efficiency. While helical pipes show lower total heat transfer, they offer higher efficiency per unit flow [7, 8].

This research uses 3D finite element modeling in COMSOL to analyze the effects of pile length, pipe diameter, material, flow rate, and spacing between pipes across various pipe configurations. Using the Taguchi method, the study ranks the influence of each parameter on thermal performance, providing practical insights for optimal energy pile design and real-world implementation.

2- Methodology

In this study, a numerical model was developed using COMSOL Multiphysics to investigate the thermal performance of a concrete energy pile embedded in a soil domain measuring 25 m × 4 m × 4 m. A 20 m long, 0.8 m diameter pile was placed at the center of the domain. The

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

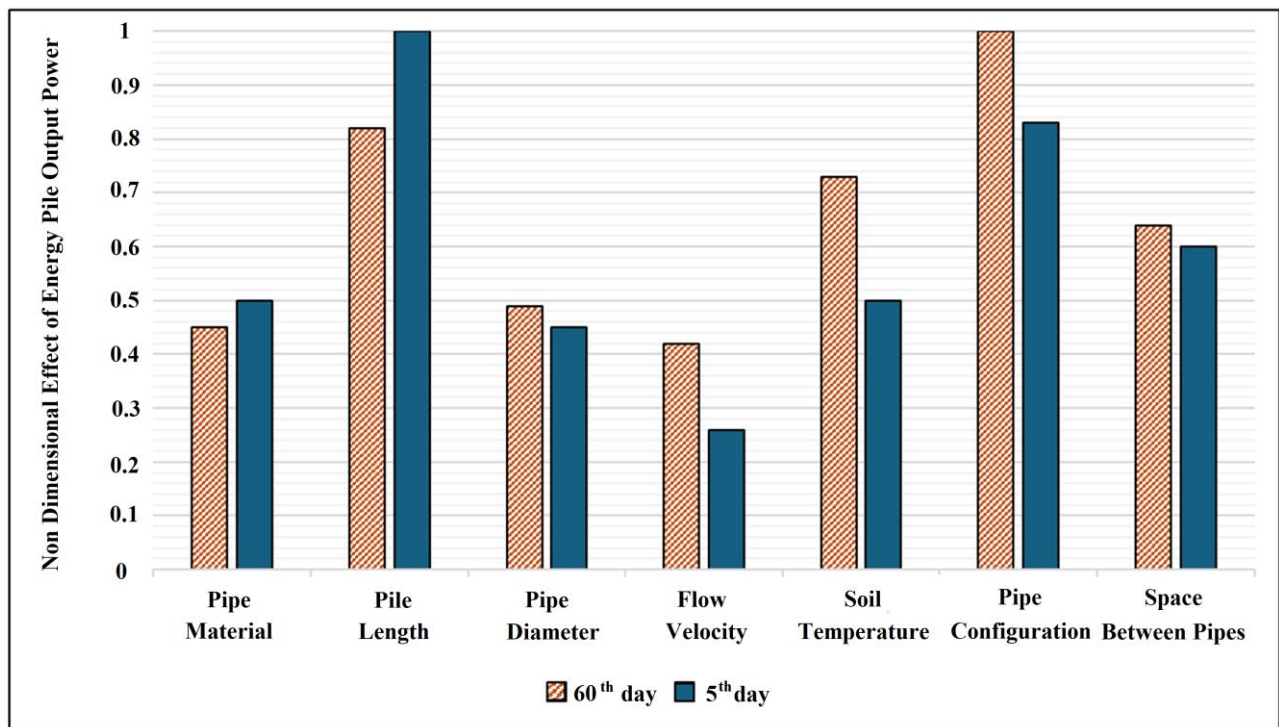


Fig. 1. Non dimensional effect of different parameters on energy output of energy pile.

chosen dimensions enable practical implementation using conventional drilling equipment with reduced costs and technical constraints.

The heat exchange system consists of high-density polyethylene (HDPE) U-shaped pipes, each 16 m in length, arranged in series with 200 mm center-to-center spacing. The pipes have an internal diameter of 16 mm and a wall thickness of 4 mm, surrounded by a 70 mm concrete cover. The top 4 m of the pile contains no pipe to minimize surface temperature fluctuation effects. Water, used as the heat transfer fluid, enters the system at 34 °C with a constant flow velocity of 0.4 m/s.

Boundary conditions include fixed temperatures on the lateral and bottom surfaces of the soil domain, while the top surface is thermally insulated. The initial temperature of the soil is assumed to be 14 °C.

Mesh generation was carefully optimized to ensure computational efficiency and accuracy. A combination of tetrahedral elements (for soil and pile) and prismatic elements (for pipes) was used. The prismatic mesh was generated using a 2D triangular surface mesh on the pipe cross-section, then extruded using the Swept mesh technique [9]. This approach significantly reduced the degree of freedom and computational cost. The final mesh for a single U-pipe configuration comprised 560,640 elements and 836,950 degrees of freedom.

3- Results and Discussion

An increase in the fluid flow velocity within an energy pile leads to a rise in the outlet fluid temperature. However, the relationship between flow velocity and outlet temperature is nonlinear. As the velocity increases, the rate of temperature rise diminishes, and at high velocities, the change in outlet temperature becomes negligible. Furthermore, at lower flow velocities, increasing the number of U-loops in series within the energy pile pipe results in a noticeable decrease in outlet fluid temperature. Conversely, this effect becomes insignificant at higher velocities. It was observed that by increasing the flow velocity from 0.1 m/s to 1.5 m/s, the outlet temperature increased by 30% in the U-pipe, 43% in the W-pipe, and 52% in the 3U-pipe. Similarly, the heat exchanged between the fluid and the surrounding environment increased by 38% for the U-pipe, 54% for the W-pipe, and 66% for the 3U-pipe under the same change in flow velocity.

The length of the energy pile significantly affects the outlet fluid temperature. When the pile length increased from 10 m to 70 m, the outlet temperature decreased by 20% for the U-pipe, 27% for the W-pipe, and 31% for the 3U-pipe. Notably, the majority of this temperature drop occurs at shorter pile lengths. In addition, the heat exchanged per unit length of the pile decreases substantially with increasing pile length. For instance, in the 3U-pipe configuration, this reduction exceeds 45%, while in the U-pipe it is around 20%.

Increasing the wall thickness of the polyethylene pipe

enhances the outlet fluid temperature. For instance, in a U-pipe configuration, increasing the pipe thickness from 2 mm to 10 mm results in a 2% rise in outlet fluid temperature. Although a thicker pipe wall reduces the energy pile's thermal efficiency, it must not be so thin that it fails to withstand the pressures exerted by fresh concrete during installation.

With a constant flow velocity, increasing the pipe diameter results in a higher outlet fluid temperature. At very small and very large diameters, the thermal performance of the energy pile becomes independent of the pipe length. However, for larger diameters, the amount of heat exchanged increases with pipe length. For example, at a pipe diameter of 42 mm, although the outlet temperature in the U-pipe is only 1.6% higher than that of the 3U-pipe, the amount of heat exchanged in the 3U-pipe is 88% greater than in the U-pipe.

The center-to-center spacing of the pipes plays a crucial role in mitigating thermal interference and improving the energy pile's performance. Increasing this spacing from 100 mm to 300 mm in the 3U-pipe configuration leads to a 3.2% reduction in outlet temperature. In configurations such as the 10U and 9U-pipes, where the outlet pipe carrying cooled fluid is located too close to the inlet pipe containing hot fluid, thermal interference occurs. This significantly affects the thermal efficiency of the energy pile, resulting in reduced overall performance.

Among various experimental design approaches, the Taguchi method stands out for its simplicity, efficiency, robustness, and adaptability in engineering problems. Its implementation begins with the construction of an appropriate orthogonal array, a two-dimensional matrix that defines the parameter levels for each simulation (modeling) scenario. Each row corresponds to a specific experimental run, while each column represents a particular parameter, ensuring statistical independence and mutual orthogonality between parameters. This structure allows equal representation of all parameter levels across simulations, enabling reliable identification of the most influential factors on the output. In this study, seven parameters were selected for evaluation: pipe spacing, pipe arrangement, soil domain temperature, fluid velocity, pipe diameter, pile length, and pipe material. These were chosen based on technical literature, experimental studies, and practical implementation standards. For example, pipe diameters were selected according to DIN 8074 and ISO 4427 standards for HDPE pipes with a nominal pressure rating of 16 bar. Pipe material was considered from low (HDPE) to high (steel) thermal conductivity values. Simulations were conducted over a 60-day period, with thermal performance evaluated on day 5 and day 60 as representatives of short-term and long-term behavior. Statistical analysis, particularly the mean-level calculation method, was used to determine each parameter's effect on the system's thermal output (i.e., exchanged heat). This analysis involved averaging the output for each level, calculating the difference between levels, and ranking the parameters based on their influence.

Figure 1 illustrates the dimensionless impact of various parameters on the energy pile's output power. In the short term, soil ambient temperature and pipe material each have

about half the influence of pile length, while pipe diameter has slightly less impact. In the long term, the effects of pipe diameter, pipe material, pipe spacing, and soil temperature converge, showing similar influence levels. Notably, the impact of soil ambient temperature increases by over 50% in the long term, likely due to the system approaching thermal equilibrium, making soil conditions more significant for sustained energy output performance.

4- Conclusions

In this study, the impact of various parameters—including flow velocity, pile length, pipe diameter, pipe wall thickness, and others—on the thermal performance of energy piles was investigated using three-dimensional finite element numerical modeling. U-shaped heat exchange pipes, arranged in series, were employed within the energy pile system. The developed numerical model was validated against previous experimental and numerical studies, ensuring its accuracy and reliability for further analysis. Additionally, the Taguchi statistical method was applied to evaluate and compare the influence of each parameter on the output thermal power of the energy pile system.

Increasing fluid flow velocity raises the outlet temperature, but the relationship is nonlinear, with diminishing temperature gains at higher velocities. At low velocities, increasing the number of U-shaped pipes in series significantly lowers outlet temperature, while this effect is minimal at high velocities. Changing flow velocity from 0.1 to 1.5 m/s increased outlet temperature by 30% (U-pipe), 43% (W-pipe), and 52% (3U-pipe), with corresponding heat exchange increases of 38%, 54%, and 66%. Longer pile lengths reduce outlet temperature and heat exchange per unit length, especially for shorter piles. Larger pipe diameters increase outlet temperature but show length-independent performance at extreme sizes. Increasing polyethylene pipe thickness raises outlet temperature slightly but may reduce system efficiency. Larger center-to-center pipe spacing reduces thermal interference, improving performance. Taguchi analysis identified pile length, pipe arrangement, and pipe spacing as the most influential parameters on output power, with flow velocity having a comparatively minor effect.

References

- [1] P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, Global warming of 5/1 C, *An IPCC*, (2018).
- [2] IEA, Direct CO₂ emissions from buildings-related heating by fuel in the Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-emissionsfrom-buildings-related-heating-by-fuel-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>, IEA. Licence: CC BY 0/4.
- [3] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski, F. Haghighat, A review on energy piles design, sizing and modelling, *Energy*, 122 (2017) 390-407.
- [4] 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).
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] P. Cui, W. Yang, W. Zhang, K. Zhu, J.D. Spitler, M. Yu, Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives, *Energy and Built Environment*, 5(2) (2024) 255-269.
- [9] T.Y. Ozudogru, C.G. Olgun, A. Senol, 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers, *Geothermics*, 51 (2014) 312-324.



مدلسازی عددی و بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف در بازدهی و عملکرد حرارتی شمع انرژی

محمدحسین صبحدم، محمدمهدی احمدی*

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

کلمات کلیدی:

انرژی زمین گرمایی

شمع انرژی

عملکرد حرارتی

مدلسازی عددی

روش تاگوچی

خلاصه: در سال‌های اخیر با رشد صنعت در جوامع مدرن، میزان مصرف انرژی در جهان رو به افزایش بوده است. به همین دلیل دولت‌ها و صاحبان صنایع در راستای تسهیل استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر اقدام به سرمایه‌گذاری کرده‌اند. انرژی زمین گرمایی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که از اقتصادی‌ترین راه‌های بهره‌گیری از این انرژی، استفاده از سیستم‌های تبادل حرارت در شمع‌ها است. شمع انرژی با استفاده از سیال تبادل حرارت و لوله‌های انتقال سیال، در فصل‌های گرم سال از دامنه خاکی جهت سرمایش و در فصل‌های سرد سال از انرژی گرمایی خاک جهت گرمایش استفاده می‌کند. پارامترهای زیادی در طراحی شمع‌انرژی‌ها دخیل هستند. در این پژوهش با استفاده از مدلسازی عددی سه بعدی و به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار COMSOL Multiphysics به بررسی اثر هریک از این پارامترها در عملکرد حرارتی شمع انرژی می‌پردازیم. سرعت جریان سیال، طول شمع، قطر و ضخامت لوله و فاصله مرکز تا مرکز لوله‌های انتقال سیال از جمله پارامترهایی هستند که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین با استفاده از روش مطالعه آماری تاگوچی اثر پارامترهای مهم بر توان خروجی شمع انرژی، در کوتاه مدت و بلند مدت، مقایسه و رتبه بندی شدند. نتایج بدست آمده نشان دادند که کاهش سرعت جریان، افزایش طول شمع، کاهش قطر و ضخامت لوله موجب کاهش دمای سیال خروجی از شمع انرژی می‌شود. به علاوه نحوه قرارگیری لوله‌ها، طول شمع و فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها نسبت به دیگر پارامترها، مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر توان خروجی شمع انرژی هستند.

۱- مقدمه

در سالیان اخیر توجه و علاقه جامعه علمی و مهندسی به شمع انرژی همانند دیگر فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار افزایش یافته است. یکی از دلایل آن این است که دمای کره زمین نسبت به سالیان گذشته افزایش محسوسی داشته است. طبق گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۱ افزایش دمای سطح زمین چیزی در حدود $1/5^{\circ}\text{C}$ نسبت به سالیان قبل از انقلاب صنعتی بوده است و در صورتی که این روند متوقف نشود می‌تواند عواقب جبران ناپذیری داشته باشد. دلیل اصلی این اتفاق، انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای است [۱]. بکارگیری سیستم‌های سرمایش و گرمایشی بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد چرا که طبق اعلام آژانس بین‌المللی انرژی^۲

میزان انتشار سالیانه گاز CO_2 ناشی از گرمایش ساختمان‌ها با استفاده از سوخت‌های فسیلی در سال‌های اخیر چیزی بیش از ۲۲۵۰ مگا تن بوده است [۲]. یکی از روش‌های مطرح در این زمینه استفاده از پمپ‌های حرارتی با منبع زیرزمینی^۳ (GSHP) جهت تبادل گرما با محیط خاکی و سنگی است. شمع‌های انرژی یکی از انواع سیستم‌های GSHP هستند که تلفیقی از شمع‌های سازه‌ای با لوله‌های تبادل گرما می‌باشند. شمع‌های انرژی به علت داشتن قابلیت انجام همزمان عملکرد سازه‌ای و تامین انرژی نسبت به دیگر ژئوسازه‌های انرژی محبوبیت بیشتری دارند [۳]. با این وجود استاندارد جامعی که بتواند تعاملات پیچیده بین رفتارهای حرارتی و مکانیکی شمع‌های انرژی را شامل گردد موجود نیست و طراحی شمع‌های انرژی بیشتر بر اساس معادلات تجربی صورت می‌گیرد [۴].

مطالعات تجربی و عددی مختلفی جهت بررسی عملکرد حرارتی شمع

انرژی در ادبیات فنی موجود است. للویی و همکاران^۴ [۵] مطالعه‌ای برجا

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

2. International Energy Agency

3. Ground Source Heat Pump

4. Laloui

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mmahmadi@sharif.edu

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



ضخامت لوله و ضریب گذردهی حرارتی خاک تاثیر کمی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی دارند.

یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر عملکرد حرارتی شمع انرژی وجود جریان آب زیرزمینی است که مورد مطالعه محققین بوده است [۱۲]. یو و همکاران^۶ [۱۳] با ساخت شمع انرژی در نزدیکی دریاچه بینهای^۷ در چین آزمایشات پاسخ و عملکرد حرارتی^۸ را در خاک منطقه انجام دادند. همچنین آن‌ها با ساخت یک مدل عددی سه بعدی به بررسی تاثیر شرایط مختلف جریان آب زیرزمینی در عملکرد حرارتی شمع انرژی پرداختند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت جریان آب زیرزمینی، میانگین دمای آب ورودی و خروجی به داخل لوله کاهش یافته و عملکرد حرارتی شمع به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین، حتی جریان جزئی آب زیرزمینی می تواند تأثیر نسبتاً زیادی بر عملکرد تبادل حرارتی شمع انرژی داشته باشد. حسنی نژاد و همکاران [۱۴] در یک مطالعه دیگر با در نظر گرفتن دمای سطح زمین نشان دادند که تاثیر مثبت جریان آب زیرزمینی در طول فصل‌های سرد بیشتر از فصل‌های گرم است. نجفیان و همکاران [۱۵] تاثیر آب‌های زیرزمینی محصور نشده^۹ در هندسه شیب‌دار را بررسی کردند و دریافتند که در صورت وجود منبع حرارتی، همرفت طبیعی می تواند موجب افزایش دمای سطح زمین شود که این اتفاق در شرایط محصور^{۱۰} پر رنگ تر است. در مطالعه‌ای که اخیراً انجام شده، فتاحیان و همکاران [۱۶] دریافتند که وجود جریان آب زیرزمینی سطحی همیشه موجب بهبود عملکرد حرارتی شمع انرژی نمی گردد و در صورت در نظر گرفتن دمای سطح زمین و همرفت طبیعی بصورت همزمان، افت محسوسی در توان خروجی شمع انرژی اتفاق می افتد.

نحوه چینش لوله‌های تبادل حرارت در شمع انرژی (شکل حلقه‌ها، نحوه اتصال، فاصله بین لوله‌ها و ...) یکی از مهمترین پارامترهای طراحی و ساخت شمع انرژی است چرا که می تواند بر نرخ تبادل گرما در شمع انرژی و توانایی استخراج و تزریق گرما در سیستم بسیار تاثیرگذار باشد. متداول ترین شکل قرارگیری لوله‌ها در شمع انرژی لوله‌های U شکل تکی و چندتایی، لوله W شکل و لوله‌های مارپیچی است [۱۷-۱۹]. پارک و همکاران^{۱۱} [۲۰-۲۱] با ساخت شمع انرژی‌های درجا با قطر بزرگ و در نظر گرفتن مدت زمان

با هدف بررسی رفتار شمع انرژی در ابعاد واقعی تحت بارگذاری حرارتی- مکانیکی^۱ انجام دادند تا تاثیر حرارت بر رفتار سازه‌ای شمع را بررسی کنند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش دمای شمع باعث ایجاد تنش محوری فشاری و کرنش محوری انبساطی در طول شمع می شود. قاسمی فر و باسو^۲ [۶] یک منبع حرارتی استوانه‌ای را با استفاده از روش تفاضل محدود مدل کردند و به بررسی چگونگی تبادل حرارت بین شمع و محیط اطراف پرداختند. آن‌ها دریافتند که انتقال حرارت از طریق شمع زمین گرمایی یک پدیده شعاعی است و دمای سیال حامل گرما بصورت خطی در طول شمع تغییر می کند و بعد از مدت کوتاهی دمای آن به حالت پایدار می رسد. لاوریدج و پآوری^۳ [۷] با استفاده از مدل عددی مقاومت حرارتی شمع‌های انرژی را بررسی کردند و رابطه‌ای تجربی برای آن ارائه دادند. حسنی نژاد و همکاران [۸] عملکرد حرارتی شمع انرژی ساخته شده از فولاد تحت شرایط تابستانی و زمستانی را مطالعه کردند. این بررسی از طریق یک مدل عددی سه بعدی با لوله U شکل که تبادل گرما بین شمع و خاک را شبیه سازی می کرد انجام شد. نتایج نشان داد که فرض دما ثابت بر روی طول جدار شمع منجر به نتایج نادرست در رفتار مکانیکی شمع انرژی می شود.

عبدالعزیز و همکاران [۹] با انجام تحلیل‌های عددی، بررسی‌های مختلفی بر تبادل گرما در شمع انرژی و در شرایط مختلف عملیاتی انجام دادند. در تحقیقات آن‌ها مشخص شد که ضریب هدایت حرارتی خاک و سنگ تاثیر قابل توجهی بر روی عملکرد حرارتی شمع دارد درحالی که تاثیر ضریب هدایت حرارتی خود شمع تاثیر کمتری دارد. همچنین دریافتند که رژیم جریان در لوله‌های انتقال حرارت تاثیر زیادی بر عملکرد شمع انرژی دارد. سسیناتو و لاوریدج^۴ [۱۰] به بررسی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد حرارتی شمع انرژی پرداختند. آن‌ها با ساخت مدل‌های سه بعدی در نرم افزار Abaqus تاثیر پارامترهایی نظیر طول و قطر شمع، تعداد لوله‌ها و همچنین ضریب هدایت حرارتی بتن و سیال را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که به حداکثر رساندن سطح کل لوله در دسترس برای انتقال حرارت مهمترین عامل جهت افزایش بهره‌وری شمع انرژی است. همچنین افزایش تعداد لوله‌های نصب شده در مقطع عرضی و افزایش طول شمع انرژی را نیز پیشنهاد داده اند. در مطالعه دیگر هریدی^۵ و همکاران [۱۱] با بررسی پارامترهایی نظیر ضریب گذردهی حرارتی لوله، شمع و بتن و چند پارامتر دیگر، دریافتند که تغییرات

6. You

7. Binhai lake

8. Thermal Response\Performance Test

9. Najafian

10. Unconfined

11. Confined

12. Park

1. Thermo - Mechanical

2. Ghasemi Fare and Basu

3. Loveridge and Powrie

4. Cecinato and Loveridge

5. Haridy

کمتری را موجب می‌گردد.

همانطور که در متون فنی بالا که منتخبی از مقالات موجود در این زمینه بودند مشاهده شد، همواره پژوهشگران در تلاش برای افزایش بازدهی شمع انرژی بوده‌اند و با ارائه‌ی مدل‌های مختلف حلقه‌های انرژی و همچنین استفاده از مواد متفاوت جهت ساخت شمع انرژی در این راه قدم برداشته‌اند. همانطور که مطرح شد پارامترهای مختلفی وجود دارند که بر بازدهی شمع انرژی می‌تواند اثر گذار باشند. در این پژوهش، با استفاده از مدل سه‌بعدی به روش المان محدود در نرم‌افزار COMSOL، اثر عواملی نظیر طول شمع، قطر لوله، ضخامت جدار و جنس لوله، سرعت جریان و فاصله مرکز تاملرکز لوله‌های تبادل حرارت بر دمای سیال خروجی و توان دریافتی از شمع انرژی، با استفاده از لوله‌های U شکل، W شکل، 3U شکل، ...، 10U شکل (همگی بصورت سری) بطور دقیق و جزئی بررسی می‌شوند. همچنین بعد از مشخص شدن نحوه اثرگذاری هریک از این عوامل بر عملکرد حرارتی شمع انرژی، این سوال مطرح می‌شود که اثر کدام یک از این پارامترها بر عملکرد حرارتی شمع انرژی نسبت به یکدیگر بیشتر است و در هنگام طراحی و اجرای شمع انرژی کدام پارامترها بر میزان توان خروجی تاثیر بیشتری دارند و باید بیشتر مورد توجه قرار گیرند. جهت پاسخ به این سوال با استفاده از روش محاسبه تاگوشی^۵، پارامترهای مهم و تاثیرگذار در میزان توان دریافتی از سیستم شمع‌انرژی رتبه‌بندی می‌شوند و اثر بدون بعد هر یک از پارامترهای مطرح شده نسبت به یکدیگر بررسی و مقایسه می‌گردند. در این راه نکات و اصول اجرایی در ساخت یک شمع انرژی در ابعاد واقعی در نظر گرفته می‌شود تا نتایج این پژوهش بتواند مورد استفاده مهندسين قرار گیرد و جنبه‌ی اجرایی داشته باشد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- فرایند انتقال حرارت در انرژی شمع

فهم دقیق نحوه تبادل گرما بین یک انرژی شمع با محیط خاکی اطراف جهت بررسی و مطالعه انرژی شمع‌ها امری ضروری است. در این فرآیند گرما از زمین به سیال در جریان داخل لوله‌ها (و یا بالعکس) منتقل می‌شود. سپس با استفاده از پمپ‌های حرارتی از این گرما جهت امور سرمایشی و گرمایشی در ساختمان‌ها استفاده می‌شود. مکانیزم انتقال حرارت در شمع انرژی در شکل ۱ نمایش داده شده است که به طور خلاصه عبارت است از:

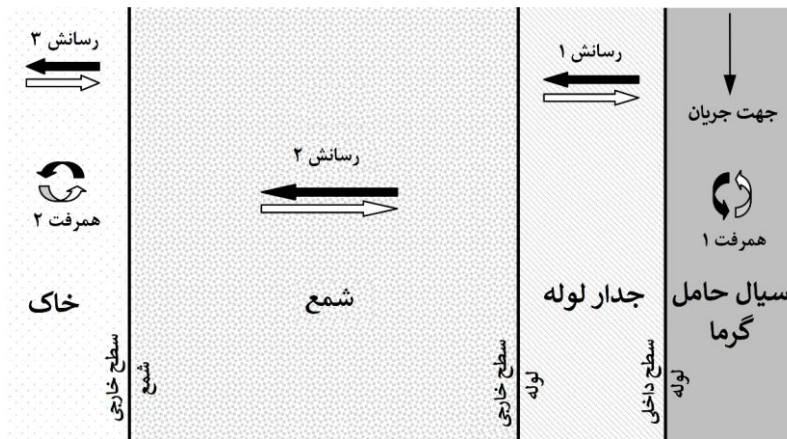
- انتقال حرارت همرفتی بین سیال در گردش با سطح داخلی دیواره لوله (همرفت ۱)

ساخت و سهولت اجرا به بررسی عملکرد حرارتی شمع انرژی با حالت‌های مختلف قرارگیری لوله‌های تبادل گرما و یافتن مدل بهینه‌تر پرداختند. آن‌ها در این پژوهش عملکرد حرارتی ۶ حالت مختلف قرار گیری لوله‌ها شامل 5U، 8U و 10U موازی، لوله‌های مارپیچ با گام‌های ۲۰۰ mm و ۵۰۰ mm و لوله‌های S شکل را مورد بررسی قرار دادند و آن‌ها را از نظر صرفه اقتصادی نیز مقایسه کردند. همچنین نتایج آزمایش‌های عملکرد حرارتی انجام شده، با مدل‌های ریاضی استوانه‌ای نیز مقایسه شدند. پارک در محل و یانگ در آزمایشگاه بروی مدل مارپیچی لوله‌های انتقال حرارت مطالعه کردند. آزمایشات یانگ و همکاران^۱ [۲۲] نشان داد که کاهش گام لوله‌ها در مدل مارپیچ موجب افزایش نرخ تبادل حرارت در شمع انرژی می‌شود اما مقدار نسبت تبادل حرارت به طول لوله را کاهش می‌دهد.

کاروتنوتو و همکاران^۲ [۲۳] بازدهی حرارتی شکل‌های مختلف قرارگیری لوله‌های انتقال حرارت شامل لوله‌های U شکل، U شکل دوتایی، U شکل سه‌تایی و مارپیچ را با ساخت مدل سه‌بعدی با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها نرخ جریان ثابتی را در هر یک از لوله‌ها اعمال کردند به شکلی که در مدل U شکل و مارپیچی از نرخ جریان $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ، در مدل U شکل دوتایی $0.6 \times 2 \text{ m}^3/\text{s}$ و در مدل U شکل سه‌تایی $0.6 \times 3 \text{ m}^3/\text{s}$ استفاده شد. آن‌ها دریافتند که مدل مارپیچی کمترین تبادل گرما را نسبت به مدل‌های دیگر داشته اما بازدهی آن به نسبت بهتر بوده است. میزان تبادل گرمای این مدل نسبت به مدل U شکل دوتایی $6/9\%$ کمتر بوده که با توجه به نصف بودن نرخ جریان آن عدد قابل ملاحظه‌ای است. لقواسمه^۳ و همکاران [۲۴] با استفاده از لوله‌های U شکل موازی و سری، تاثیر عدم قرارگیری در جای صحیح لوله‌های تبادل حرارت را بررسی کردند و دریافتند که در غیر متقارن‌ترین حالت قرارگیری لوله‌های تبادل حرارت، میزان توان خروجی شمع انرژی می‌تواند تا 3% نسبت به حالت متقارن کاهش پیدا کند. در مطالعه‌ای دیگر، ایزاز^۴ و همکاران [۲۵] نشان دادند که علاوه بر عملکرد حرارتی شمع انرژی، انتخاب پارامترهای مناسب جهت طراحی شمع انرژی از لحاظ اقتصادی و انتشار گاز کربن نیز بسیار تاثیرگذار هستند. طبق نتایج آن‌ها، افزایش طول شمع انرژی از ۱۰ m به ۲۰ m، در مجموع موجب صرفه اقتصادی ۷۸٪ خواهد شد. همچنین افزایش فاصله شمع‌های انرژی از یکدیگر از فاصله ۲/۰۵ m به ۶/۴ m، ۷۶٪ انتشار گاز کربن دی‌اکسید

1. Yang
2. Carotenuto
3. Alqwasmeh
4. Ayaz

5. Taguchi method



شکل ۱. نحوه انتقال حرارت در یک سیستم انرژی شمع (تصویر مقیاس نیست)

Fig. 1. Heat transfer in energy pile system (picture is not scale)

انتقال حرارت در داخل شمع انرژی و محیط خاکی با استفاده از پارامترهای ذکر شده و معادله بقای انرژی و با فرض عدم تولید حرارت داخلی و عدم وجود جریان آب زیرزمینی بصورت رابطه (۱) محاسبه می شود [۲۷]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (1)$$

ρ چگالی (kg/m^3) و C ظرفیت گرمایی ویژه (J/(kg.K)) می باشد. سمت راست معادله نشان دهنده نرخ خالص گرمای شار شده به داخل مواد است که در آن k ضریب هدایت حرارتی (W/(m.K)) و T دمای مواد بر حسب کلوین (K) است.

مقادیر معادل $(\rho C)_e$ و k_e و معادله بقای انرژی برای محاسبه انتقال گرما در محیطهای متخلخل استفاده می شود (محیط متخلخل دارسی) [۲۷]:

$$(\rho C)_e = n \rho_f C_{P,f} + (1-n) \rho_{soil} C \quad (2)$$

$$k_e = n k_f + (1-n) k_{soil} \quad (3)$$

که در رابطه (۲) و (۳)، $(\rho C)_e$ و k_e به ترتیب ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی معادل محیطهای متخلخل در واحد حجم است. این مقادیر به ظرفیت گرمایی ویژه قسمت جامد (C)، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار

- انتقال حرارت رسانایی در داخل بدنه لوله (رسانش ۱)
- انتقال حرارت رسانایی در داخل شمع (رسانش ۲)
- انتقال حرارت رسانایی در داخل محیط خاکی (رسانش ۳)
- انتقال حرارت همرفتی ناشی از جریان آبهای زیر زمینی، در صورت وجود (همرفت ۲)

همانطور که در شکل ۱ مشخص می باشد فلش های تیره بیانگر انتقال حرارت به داخل زمین (عملیات سرمایش) و فلش های روشن بیانگر استخراج حرارت از زمین (عملیات گرمایش) می باشد [۲۶].

۲-۲- معادلات حاکم بر مسئله

نرم افزارهای زیادی با امکانات مختلفی جهت مدلسازی های سه بعدی در دسترس هستند. در این پژوهش جهت انجام مدلسازی سه بعدی به منظور تحلیل عملکرد حرارتی مدل های مختلف شمع انرژی از نرم افزار COMSOL Multiphysics که مبتنی بر روش المان محدود است استفاده شده است. فیزیک های جریان غیر هم دما درون لوله ها و انتقال حرارت رسانایی و وظیفه اعمال برهم کنش سه دامنه متمایز خاک، بتن و لوله های انتقال حرارت را برعهده دارند. برای بدست آوردن معادلات دیفرانسیل بیان شده در زیر از چندین پارامتر کلیدی استفاده شده است. ضریب هدایت حرارتی (k)، ظرفیت گرمایی ویژه (C) و چگالی (ρ) محیط خاکی، بتن شمع و لوله های تبادل حرارت تعبیه شده در شمع، در نرخ و میزان حرارت انتقال یافته نقش خواهند داشت.

1. Nonisothermal Flow in Pipes

جمله دوم سمت راست رابطه (۷) مربوط به گرمای اصطکاک است که در اثر برش ویسکوز تلف می‌شود. انتقال حرارت شعاعی از محیط اطراف به لوله (Q_{wall}) برابر است با [۲۷]:

$$Q_{wall} = h_{eff}(T_{ext} - T) \quad (۸)$$

$$h_{eff} = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_0 h_{int}} + \frac{\ln(r_1/r_0)}{k_{HDPE}}} \quad (۹)$$

که در رابطه (۸) و (۹) T_{ext} دمای بیرونی سطح لوله (K)، r_0 شعاع داخلی لوله انتقال حرارت (m)، r_1 شعاع خارجی لوله (m)، k_{HDPE} ضریب هدایت حرارتی لوله پلی اتیلن با تراکم بالا (W/m.K) و h_{int} و h_{ext} ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی داخل لوله است که وابسته به عدد ناسلت^۱ (Nu) جریان می‌باشند [۲۷]:

$$h_{int} = Nu \frac{k_f}{d_h} \quad (۱۰)$$

عدد ناسلت، نسبت انتقال حرارت به روش همرفتی به انتقال حرارت هدایتی در طول یک مرز است و تابعی از عدد رینولدز و عدد پرنڈتل (Pr) می‌باشد. این عدد برای جریان آرام عدد ۳/۶۶ می‌باشد و برای جریان‌های آشسته با استفاده از رابطه پیشنهادی گنیلینسکی [۲۹] بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu = \frac{(f_d/8)(Re-1000)Pr}{1+7/12(f_d/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}, \quad (۱۱)$$

$$5 < Pr < 2000, 3000 < Re < 6 \times 10^6$$

و در نهایت توان بدست آمده از گردش سیال داخل لوله‌های تبادل حرارت شمع انرژی از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است [۳۰]:

ثابت سیال منفذی (C_{pf})، چگالی سیال منفذی (ρ_f) و ضریب هدایت حرارتی سیال منفذی (k_f) وابسته‌اند. همچنین $(1-n)$ نسبت حجم اشغال شده توسط قسمت جامد به حجم کل خاک را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر از المان لوله‌ای یک بعدی برای مدلسازی لوله‌های مبدل گرما استفاده شده است. مدلسازی یک بعدی لوله‌ها در یک مدل دو بعدی و یا سه بعدی کمک بسیار بزرگی به کاهش حجم محاسبات و صرفه جویی در زمان می‌کند. این ساده‌سازی جریان در لوله‌ها با استفاده و حل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت محقق می‌شود که به قرار زیر هستند [۲۷]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla_t p \cdot e_t - \frac{1}{2} f_d \frac{\rho_f}{d_h} |u| u \quad (۴)$$

$$\frac{\partial A \rho_f}{\partial t} + \nabla_t (A \rho_f u e_t) = 0 \quad (۵)$$

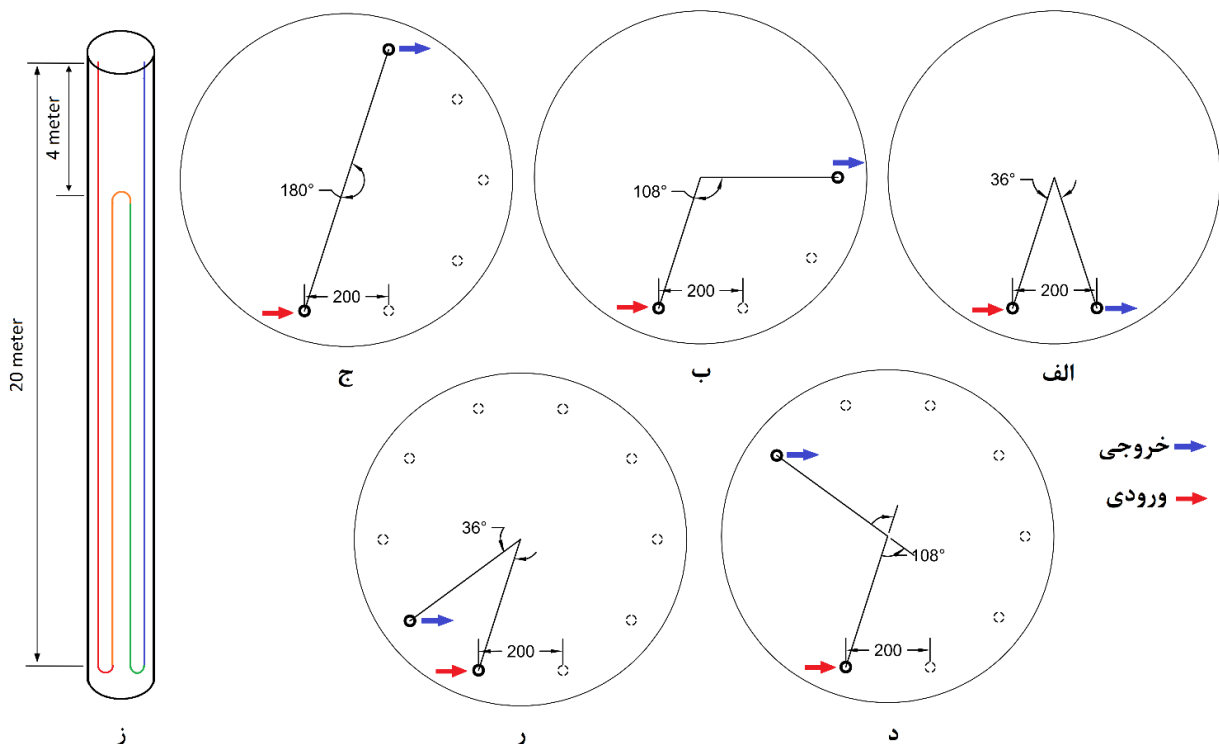
که در رابطه (۴) و (۵)، p فشار داخل مبدل حرارتی (N/m^2)، e_t بردار واحد مماسی امتداد لوله، f_d ضریب اصطکاک دارسی، ρ_f چگالی سیال (kg/m^3)، d_h قطر هیدرولیکی لوله (m)، u سرعت جریان داخل لوله (m/s) و A مساحت مقطع لوله (m^2) می‌باشد. ضریب اصطکاک دارسی در سمت راست رابطه (۴) نشانگر میزان افت فشار ناشی از گرانروی برشی در امتداد طول لوله است و بصورت تابعی از عدد رینولدز (Re) و نسبت سختی سطح به قطر هیدرولیکی (e/d_h) (رابطه (۶)) می‌باشد [۲۷]:

$$f_d = f(Re, \frac{e}{d_h}) \quad (۶)$$

مسئله انتقال حرارت در لوله‌های مبدل گرما با فرض تراکم‌ناپذیر بودن سیال در حال چرخش و با استفاده از معادله بقای انرژی به شکل رابطه (۷) محاسبه می‌گردد [۲۸]:

$$\rho_f A C_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f A C_{pf} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot A k_f \nabla T + f_d \frac{\rho_f A}{2 d_h} |u|^3 + Q_{wall} \quad (۷)$$

1. Nusselt Number
2. Prandtl Number



شکل ۲. طرز قرار گیری لوله‌ها در مدل حاضر از نمای بالا (اعداد به میلی‌متر هستند): (الف) لوله U شکل؛ (ب) لوله W شکل؛ (ج) لوله ۳U شکل؛ (د) لوله ۴U شکل؛ (ر) لوله ۵U شکل؛ (ز) طرز قرار گیری لوله W شکل در طول شمع

Fig. 2. The arrangement of the pipes in the present model from the top view (numbers are in millimeters): a) U-shaped pipe; b) W-shaped pipe; c) 3U-shaped pipe; d) 4U-shaped pipe; d) 5U-shaped pipe; g) Arrangement of the W-shaped pipe along the pile

از لوله‌هایی از جنس پلی اتیلن با تراکم بالا، با قطر داخلی ۱۶ mm و ضخامت ۴ mm و با فاصله مرکز تا مرکز ۲۰۰ mm و با آرایش nU بصورت سری در داخل شمع انرژی با پوشش بتن ۷۰ mm استفاده شده است. طول هریک از لوله‌ها ۱۶ m می‌باشد و با سطح زمین فاصله‌ای ۴ m دارند که دلیل آن کم کردن تاثیر تغییرات دما در سطح زمین بر لوله‌های تبادل حرارت است. همچنین از آب به عنوان سیال حامل گرما در لوله‌ها استفاده شده است. شکل ۲ نحوه قرارگیری لوله‌ها در داخل شمع را نشان می‌دهد.

جهت تعیین شرایط مرزی مدل، از شرط مرزی دما ثابت در جدارها و کف استفاده شده است و سطح بالایی مدل عایق گرما در نظر گرفته شده است. همچنین دمای اولیه محیط خاکی ۱۴ °C و دمای سیال هنگام ورود به سیستم ۳۴ °C است که با سرعت ثابت ۰/۴ m/s در لوله‌ها در جریان است. مشخصات فیزیکی مصالح مورد استفاده و دیگر مشخصات در جدول ۱ ارائه گردیده است.

$$Q = C_f \rho_f q_{in} (T_{inlet} - T_{outlet}) \quad (12)$$

که در آن C_f ظرفیت گرمایی ویژه سیال (J/(kg.K))، ρ_f چگالی سیال (kg/m³)، q_{in} دبی جریان داخل لوله (m³/s) و T_{inlet} و T_{outlet} به ترتیب دمای سیال هنگام ورود و خروج از لوله‌ها (K) می‌باشد.

۳- مدل رفتاری و مدلسازی

جهت ارزیابی عملکرد حرارتی شمع انرژی با نرم‌افزار COMSOL از یک دامنه خاکی با ابعاد ۴m×۴m×۲۵m استفاده شده که شمعی بتنی به طول ۲۰ m و قطر ۰/۸ m در مرکز آن قرار گرفت است. دلیل انتخاب این ابعاد این است که در صورت ساخت نمونه واقعی چنین شمعی، نیاز به تجهیزات سنگین و پیشرفته حفاری نباشد و با هزینه کم و امکانات در دسترس بتوان آن شمع را اجرا کرد. جهت مدلسازی لوله‌های تبادل حرارت،

1. High Density Polyethylene (HDPE)
2. Adiabatic

جدول ۱. مشخصات هندسی و فیزیکی مدل ساخته شده در مطالعه حاضر

Table 1. Geometric and physical characteristics of the model in the present study

دامنه شمع انرژی		
مشخصات هندسی		
طول شمع (m)	۲۰	
قطر شمع (m)	۰/۸	
قطر لوله (mm)	۲۴	
ضخامت لوله (mm)	۴	
ضخامت پوشش بتن (mm)	۷۰	
فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (mm)	۲۰۰	
مشخصات فیزیکی		
جرم مخصوص (kg/m^3)	۲۱۰۰	خاک
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	۱۲۰۰	بتن
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	۲/۴	لوله پلی اتیلن
مشخصات عملکردی		
سرعت جریان سیال (m/s)	۰/۴	
دمای ورودی سیال ($^{\circ}\text{C}$)	۳۴	
دمای محیط خاکی ($^{\circ}\text{C}$)	۱۴	

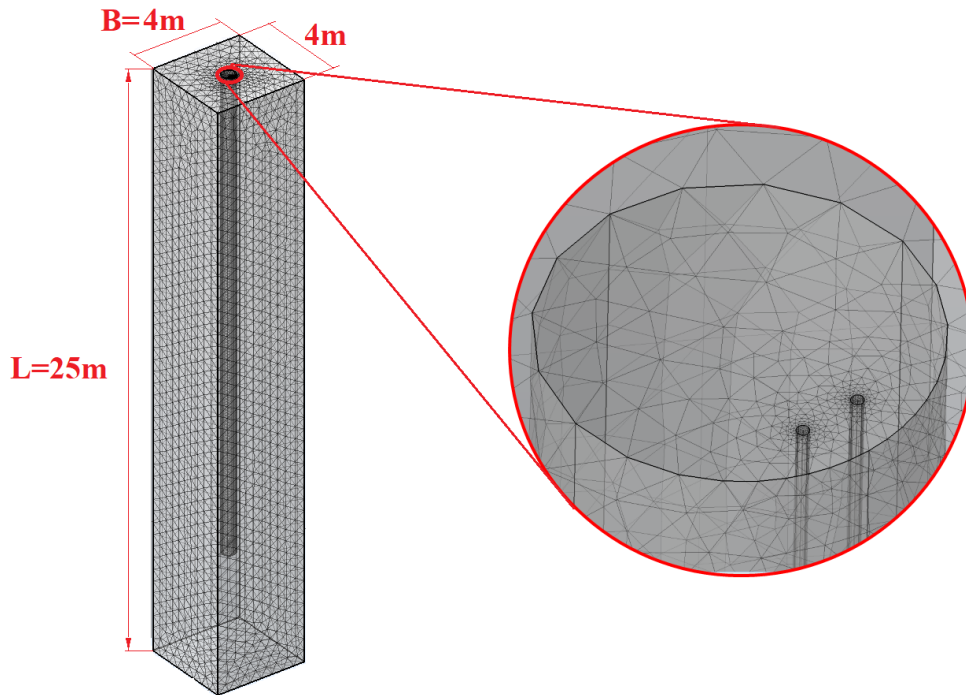
۳-۱- صحت‌سنجی

در این بخش به منظور اطمینان از صحت مدلسازی، به مقایسه پاسخ مدل ساخته شده با مطالعات پیشین خواهیم پرداخت. بدین منظور از آزمایشات عملی یو و مطالعه عددی پارک استفاده شده است.

یو و همکاران^۱ [۳۱] آزمایشات صحرایی در ابعاد بزرگ را بر روی نوع خاصی از شمع‌ها به نام شمع‌های خاکستر بادی سیمانی-شنی^۲ (CFG) انجام دادند. این شمع‌ها عمدتاً در ساخت پی ساختمان‌ها کاربرد دارد و قطر آن‌ها در حدود ۳۵۰ mm تا ۶۰۰ mm است. یو شمع‌هایی با قطر ۴۲۰ mm و طول ۱۸ m ساخت و از لوله‌های W شکل با قطر ۲۵ mm استفاده کرد که طول لوله در مجموع به ۷۰ m می‌رسید. مقایسه داده‌ها تجربی با مدل عددی ساخته شده برای یک حالت زمستانی با دمای ورودی آب 5°C و دو حالت تابستانی با دماهای ورودی 35°C و 60°C صورت گرفته است. همچنین جریان با سرعت ثابت 0.51 m/s داخل لوله‌ها در حرکت بوده و دمای زمین 16°C در نظر گرفته شده بود. جدول ۲ پارامترهای عنوان شده در مرجع را به همراه مقادیرشان نشان می‌دهد. بدلیل عدم ذکر اطلاعات

شبکه‌بندی مدل بگونه‌ای است که تراکم شبکه‌ها در لوله‌ها و در نزدیکی جدار لوله‌ها بیش از نقاط دیگر مدل باشد. برای شبکه‌بندی مدل از دو نوع شبکه چهاروجهی و منشوری استفاده شده است. در ابتدا بعد از مدلسازی دامنه‌های لوله، شمع و خاک با المان‌های چهاروجهی مشخص شد که تعداد المان‌های مورد نیاز جهت دریافت پاسخ صحیح از مدل بسیار زیاد است و به تبع آن تعداد درجات آزادی مدل بسیار زیاد خواهد شد. جهت بهینه کردن مدل و صرفه‌جویی در وقت و کاهش محاسبات مورد نیاز، برای شبکه‌بندی لوله‌ها از المان‌های منشوری استفاده شده است. برای ساخت شبکه‌های منشوری با فرض نبود جریان آب زیر زمینی و عدم تغییر دما در مرزهای دامنه خاکی با افزایش عمق، ابتدا یک شبکه دو بعدی مثلثی در سطح بالایی لوله ساخته می‌شود و سپس با استفاده از دستور Swept شبکه‌های منشوری به کل المان لوله اعمال می‌گردد [۲۷]. با انجام چندین بررسی، شبکه‌بندی با تعداد درجات آزادی ۸۳۶۹۵۰ و تعداد المان ۵۶۰۶۴۰ (این تعداد المان برای مدل با یک لوله U شکل می‌باشد) انتخاب شد و مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۳ شبکه ساخته شده را نشان می‌دهد.

1. You et.al
2. Cement-Fly Ash-Gravel



شکل ۳. هندسه و شبکه بندی مدل عددی

Fig. 3. Geometry and meshing of the numerical mode

جدول ۲. مشخصات هندسی و فیزیکی شمع ساخته شده در مطالعه یو و همکاران [۳۱]

Table 2. Geometric and physical characteristics of the pile fabricated in the study by You et al [31].

لوله W شکل	
۱۸	طول شمع (m)
۰/۴۲	قطر شمع (m)
۲۵	قطر لوله (mm)
۰/۵۱	دبی جریان (m/s)
۶۰ - ۳۵ - ۵	دمای ورودی سیال (°C)
۱۶	دمای محیط خاکی (°C)
۲۷/۶	ضریب هدایت حرارتی خاک (W/m.K)

و ویژگی‌های آن‌ها و همچنین عدم تعیین برخی پارامترهای فیزیکی خاک در مرجع باشد.

مدل عددی حاضر با نتایج مطالعه عددی پارک و همکاران [۳۲] نیز تایید شده است. در این پژوهش آن‌ها به بررسی عملکرد شمع انرژی پیش ساخته^۱ (PHC) بصورت تجربی و عددی پرداختند. آن‌ها از دو شمع پیش ساخته یکی با لوله W شکل و طول شمع ۱۳/۲۵ m و دیگری با لوله 3U

دقیق در مرجع، پارامترهایی نظیر ضخامت لوله‌ها و پوشش بتن از طریق عکس‌های موجود در مرجع و مشخصات فیزیکی مصالح بتن و لوله HDPE از طریق آنالیز برگشتی تخمین زده شده‌اند. علاوه بر این دامنه خاکی تک لایه و بدون جریان آب زیرزمینی فرض شده‌است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با نتایج یو در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

همانطور که عنوان شد اختلاف کمی که بین داده‌های تجربی و عددی مشاهده می‌شود می‌تواند ناشی از نامعلوم بودن تعداد لایه‌های دامنه خاکی

1. Pre-tensioned spun High strength Concrete piles

جدول ۳. مقایسه نتایج مطالعه یو با مطالعه حاضر.

Table 3. Comparing the results of You et al study with the present study.

نوع عملکرد	دمای سیال ورودی	دمای دامنه خاکی	دمای خروجی مطالعه یو	دمای خروجی مدل حاضر
عملکرد زمستانی	۵	۱۶	۵/۵۵	۵/۹۱
عملکرد تابستانی	۳۵	۱۶	۳۳/۴۰	۳۳/۳۲
عملکرد تابستانی	۶۰	۱۶	۵۷/۳۰	۵۶/۸۷

جدول ۴. مشخصات هندسی و فیزیکی شمع ساخته شده در مطالعه یارک و همکاران [۳۲].

Table 4. Geometric and physical characteristics of the pile fabricated in the study by Park et al [32].

لوله 3U شکل		لوله W شکل					
۳۵/۱۷		۳۵/۱۲					طول شمع (m)
۰/۴		۰/۴					قطر شمع (m)
۲۰		۲۰					قطر لوله (mm)
۲		۲					ضخامت لوله (mm)
۸۰		۹۰					ضخامت پوشش بتن (mm)
۰/۲۸۳		۰/۲۴۹					دبی جریان (kg/s)
متغیر در زمان		متغیر در زمان					دمای ورودی سیال (°C)
۱۷ (ثابت در کل دامنه)		۱۷ (ثابت در کل دامنه)					دمای محیط خاکی (°C)
آب	لوله HDPE	مصالح PHC	گروت	سنگ (لایه ۳)	خاک (لایه ۲)	خاک (لایه ۱)	
۱۰۰۰	۹۵۵	۲۷۰۰	۳۶۴۰	۲۶۴۰	۲۱۴۰	۱۸۰۰	جرم مخصوص (kg/m ³)
۴۲۰۰	۵۲۵	۷۹۰	۸۴۰	۸۲۳	۱۲۸۰	۱۱۶۰	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
۰.۷/۵	۰.۸/۳	۱۲/۶	۲۲/۰	۳۴/۲	۲/۴	۱/۱	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)

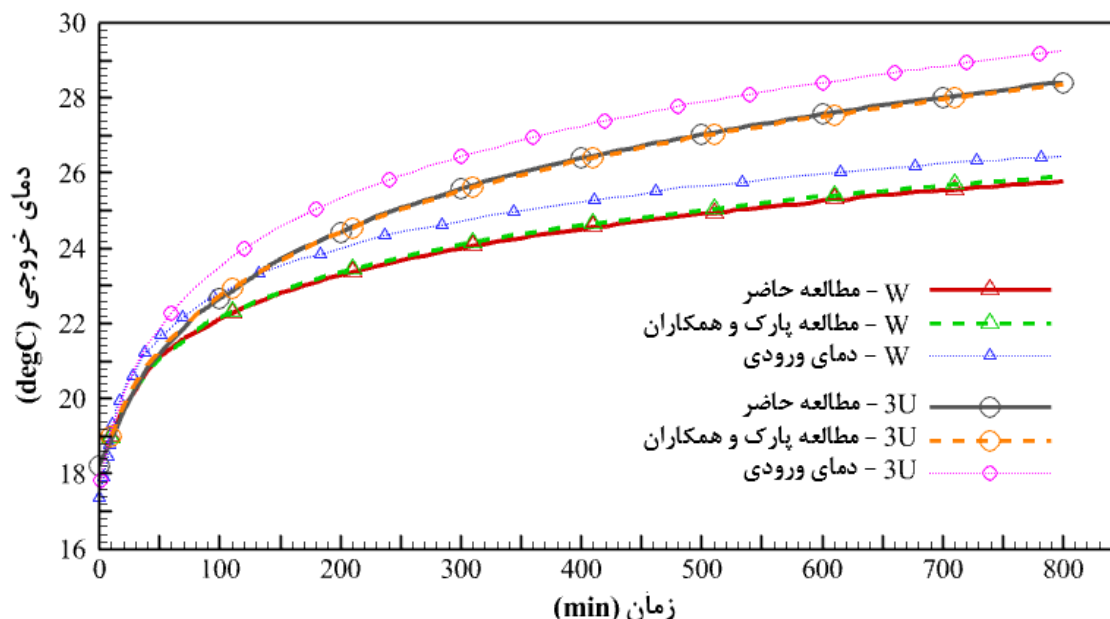
۴- نتایج و بحث

در این بخش با استفاده از مدل سه بعدی صحت‌سنجی شده، اثر تغییرات پارامترهای فیزیکی مختلف یک شمع انرژی بر دما و توان خروجی شمع انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مذکور شامل سرعت جریان داخل لوله‌ها، طول شمع انرژی، قطر و ضخامت شمع انرژی می‌باشند.

۴-۱- اثر تغییرات سرعت جریان

شکل ۵ دمای خروجی سیال از شمع انرژی در سه حالت لوله‌های U، W و 3U را به ازای سرعت‌های مختلف سیال نشان می‌دهد که با توجه به ثابت بودن سطح مقطع لوله، با افزایش سرعت جریان دبی عبوری از لوله نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت (دبی) جریان، دمای خروجی سیال افزایش می‌یابد. این بدان معنا است که در سرعت‌های پایین‌تر بازدهی حرارتی شمع انرژی بهتر می‌باشد و سیال

شکل و طول شمع $13/m\gamma 5$ استفاده کردند. دامنه خاکی متشکل از یک لایه خاک به عمق $13/5\text{ m}$ و یک لایه سنگی به ضخامت $2/25\text{ m}$ بوده است و سطح آب زیرزمینی در عمق $3/5\text{ m}$ واقع شده است. همچنین از جریان آب زیرزمینی صرف نظر شده است و دمای دامنه خاکی 17°C در نظر گرفته شده است. سیال با سرعت ثابت داخل لوله‌ها در جریان است اما دمای ورودی سیال ثابت نیست و وابسته به زمان است. جزییات پارامترهای استفاده شده در این مطالعه بطور کامل در مرجع معرفی و مشخص شده که در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۴ نتایج بدست آمده از مطالعه عددی پارک و نتایج بدست آمده از مدل ساخته شده در مطالعه حاضر را برای لوله W شکل و لوله 3U شکل بصورت وابسته به زمان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده هم‌خوانی بسیار خوبی با مطالعه عددی پارک دارد که نشان از عملکرد خوب و دقیق مدل ساخته شده در این پژوهش دارد بنابراین در ادامه از مدل عددی ساخته شده برای انجام مطالعات مدنظر استفاده شده است.



شکل ۴. مقایسه نتایج مطالعه پارک با مطالعه حاضر

Fig. 4. Comparing the results of the Park study with the present study

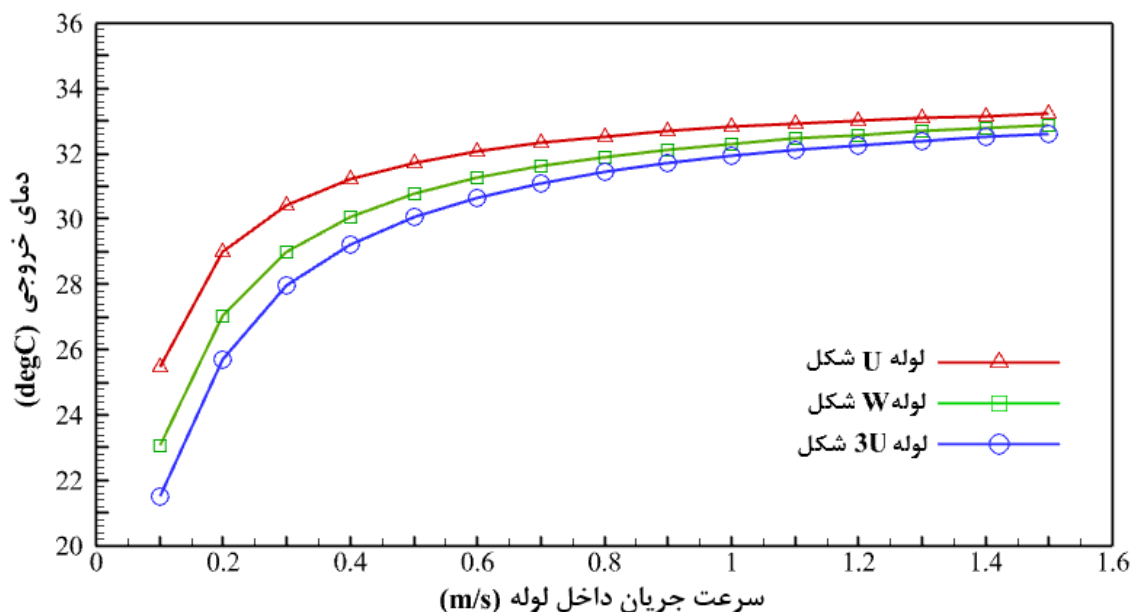
نمای شماتیک لوله‌ها را با قطرهای داخلی مختلف نشان می‌دهد. شکل ۷ اثر تغییرات قطر خارجی لوله از ۱۰ mm الی ۴۲ mm را نشان می‌دهد که در آن ضخامت لوله برابر ۴ mm و ثابت است و قطر داخلی لوله از ۲ mm تا ۳۴ mm تغییر می‌کند.

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش قطر لوله‌ها که متناظر با افزایش دبی جریان است، دمای آب خروجی از شمع انرژی افزایش می‌یابد. نرخ این افزایش در قطرهای کوچکتر در لوله U شکل بیشتر از سایر حالت‌ها می‌باشد اما در قطرهای بزرگتر نرخ افزایش دما در لوله 3U بزرگتر می‌باشد. نکته قابل توجه این است که هم در کوچکترین قطر و هم در بزرگترین قطر دمای آب خروجی در هر سه حالت قرارگیری لوله تبادل گرما بسیار به یکدیگر نزدیک هستند که نشان می‌دهد دمای سیال خروجی در قطرهای بسیار کوچک و قطرهای بسیار بزرگ تا حدودی مستقل از شکل قرارگیری لوله و طول لوله است. همچنین شکل ۸ نشان دهنده میزان گرمای مبادله شده بین سیال در جریان با محیط اطراف است که بر اساس رابطه (۱۲) محاسبه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در قطرهای خیلی کوچک گرمای مبادله شده در سیستم شمع انرژی در هر سه حالت قرارگیری لوله‌ها تقریباً یکسان است و با افزایش قطر لوله میزان آن افزایش می‌یابد. با وجود اینکه دمای خروجی سیال در لوله‌های U، W و 3U در قطرهای

فرصت بیشتری جهت تبادل گرما با محیط اطراف دارد. با توجه به شکل می‌توان فهمید که این افزایش دما در هر یک از حالت‌های قرارگیری لوله‌ها متفاوت است. در لوله U شکل با تغییر سرعت جریان از ۰/۱ m/s تا ۰/۵ m/s، دمای سیال خروجی به اندازه‌ی ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است در حالی که این افزایش در لوله‌های W و 3U به ترتیب برابر ۴۳٪ و ۵۲٪ است. دلیل این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در متراژ طول لوله‌ها در هر یک از این حالت‌ها باشد و انتظار می‌رود با افزایش طول و تعداد Uهای مورد استفاده این درصد افزایش یابد. از نکات مهم دیگر این نمودار می‌توان به این موضوع اشاره کرد که در سرعت‌های بالا، تغییر زیادی در دمای خروجی سیال مشاهده نمی‌شود. از نتایج مدلسازی دریافت شد که در لوله U شکل درصد تغییرات دمای خروجی سیال در سرعت ۰/۹ m/s به بالا کمتر از ۰/۵٪ می‌باشد. همچنین این عدد در لوله‌های W و 3U به ترتیب ۱ m/s و ۱/۱ m/s می‌باشد و در سرعت‌های بالاتر درصد تغییرات دما به کمتر از ۰/۵٪ می‌رسد.

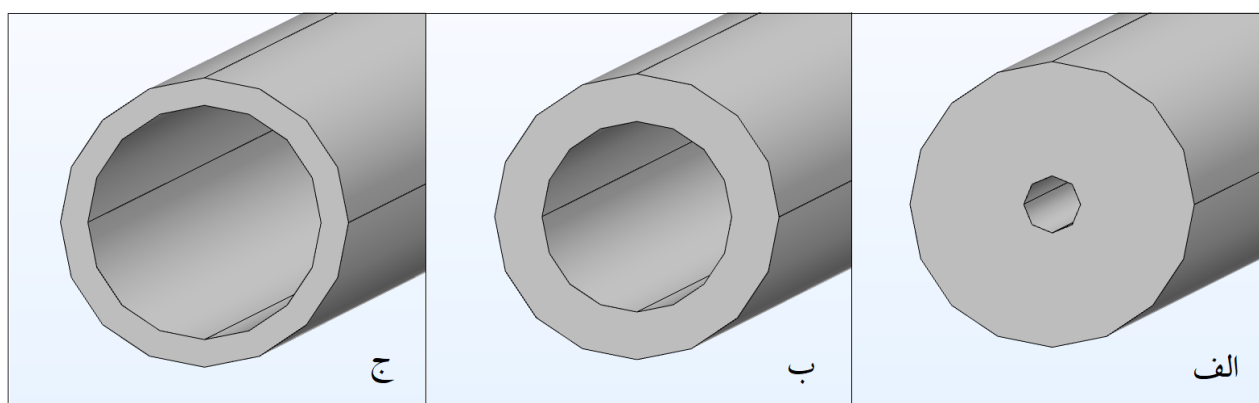
۴-۲- اثر تغییرات قطر لوله

تغییر قطر لوله مبدل حرارت با توجه به اینکه سرعت جریان ثابت و برابر ۰/۴ m/s است، می‌تواند در دمای خروجی آب بسیار تاثیرگذار باشد. شکل ۶



شکل ۵. نمودار اثر تغییرات سرعت جریان بر دمای خروجی شمع انرژی در سه حالت مختلف قرارگیری لوله U، W و 3U.

Fig. 5. Diagram of the effect of flow velocity changes on the energy pile outlet temperature in three different tube placement positions: U, W, and 3U.



شکل ۶. نمای شماتیک لوله با ضخامت جدار ۴ mm و با قطر بیرونی الف) ۱۰ mm ب) ۲۴ mm ج) ۴۲ mm

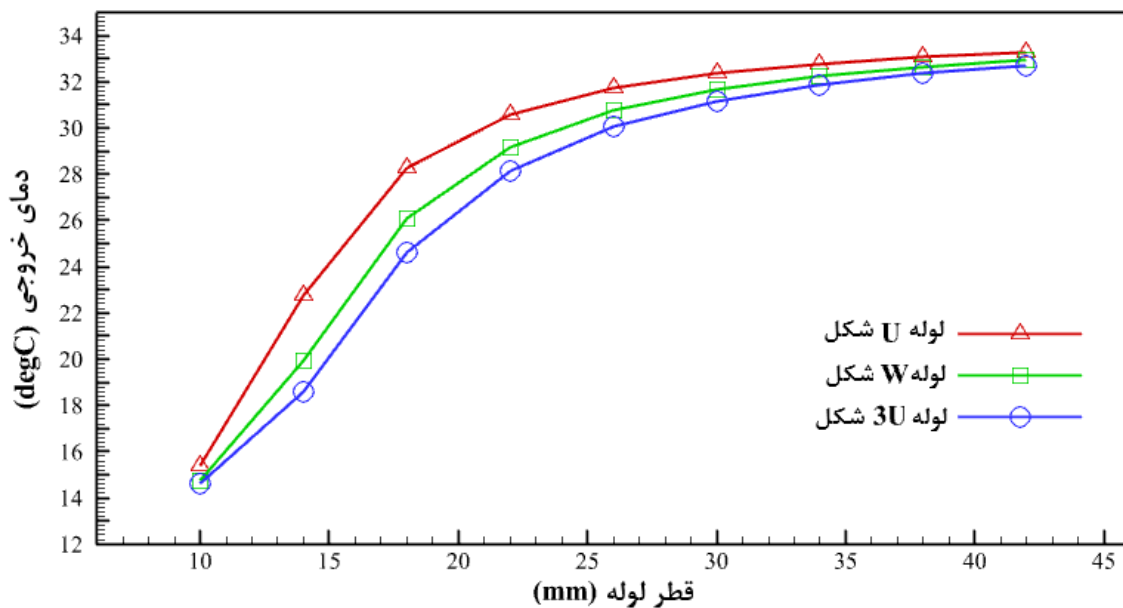
Fig. 6. Schematic view of a pipe with a wall thickness of 4 mm and an outer diameter of a) 10 mm b) 24 mm c) 42 mm

است که ۳۷٪ گرمای بیشتری در سیستم مبادله گردد این در حالی است که در لوله با قطر ۴۲ mm برای کاهش دما به میزان ۱/۶٪ باید ۸۸٪ گرمای بیشتری در سیستم مبادله گردد.

۳-۴ اثر تغییرات طول شمع

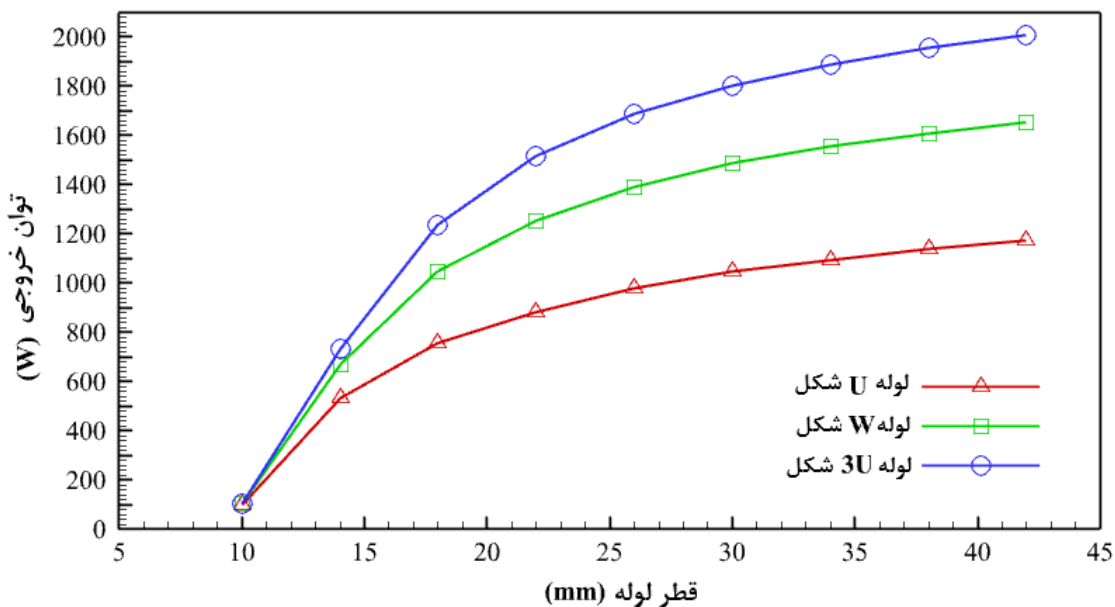
جهت بررسی عملکرد شمع انرژی با طول‌های مختلف، شمع‌هایی با طول

بزرگ به یکدیگر نزدیک است اما در شکل ۸ مشاهده می‌شود که گرمای مبادله شده در قطرهای بزرگ در لوله 3U بسیار بیشتر از لوله U است. از این موضوع می‌توان این نتیجه را گرفت که در قطرهای بزرگ لوله به دلیل زیاد بودن دبی جریان، برای ایجاد تغییر کوچک در دما خروجی سیال نیاز به تبادل حرارت بسیار زیادی بین سیال و محیط پیرامون می‌باشد. به عنوان مثال در لوله با قطر ۱۴ mm برای کاهش دما به میزان ۱۸٪ تنها کافی



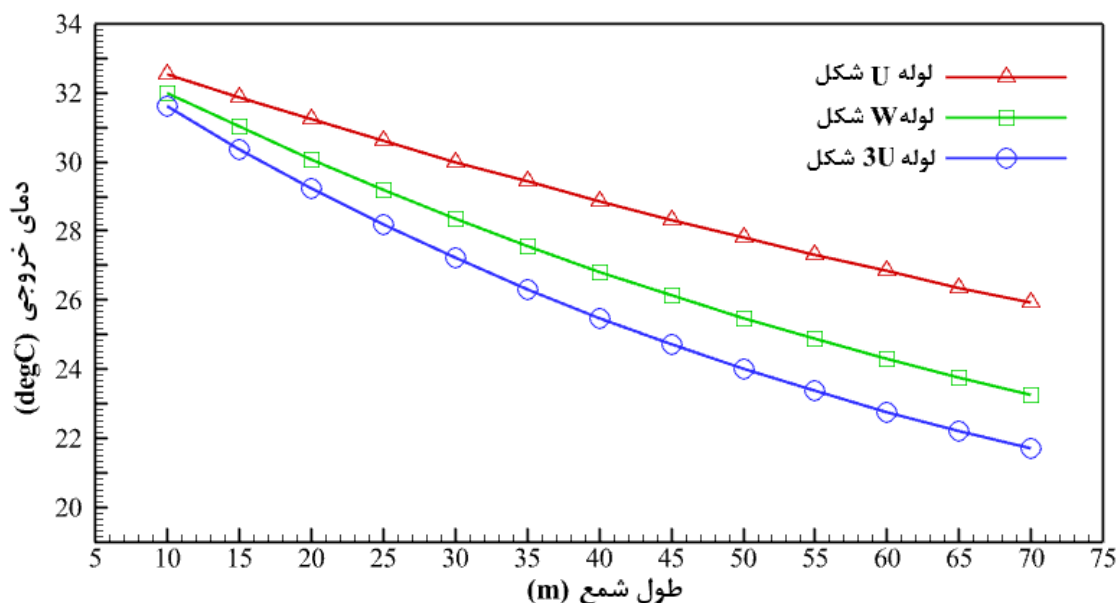
شکل ۷. نمودار اثر تغییرات قطر بیرونی لوله بر دمای خروجی انرژی شمع در سه حالت مختلف قرارگیری لوله U، W و 3U.

Fig. 7. Diagram of the effect of changes in the outer diameter of the tube on the energy output temperature of the pile in three different positions of the tube: U, W and 3U.



شکل ۸. نمودار اثر تغییرات قطر بیرونی لوله بر میزان گرمای مبادله شده در سیستم شمع انرژی در سه حالت مختلف قرارگیری لوله U، W و 3U.

Fig. 8. Diagram of the effect of changes in the outer diameter of the pipe on the amount of heat exchanged in the energy pile system in three different pipe placement positions: U, W, and 3U.



شکل ۹. نمودار اثر تغییرات طول شمع بر دمای خروجی انرژی شمع در سه حالت مختلف قرارگیری لوله W، U و 3U.

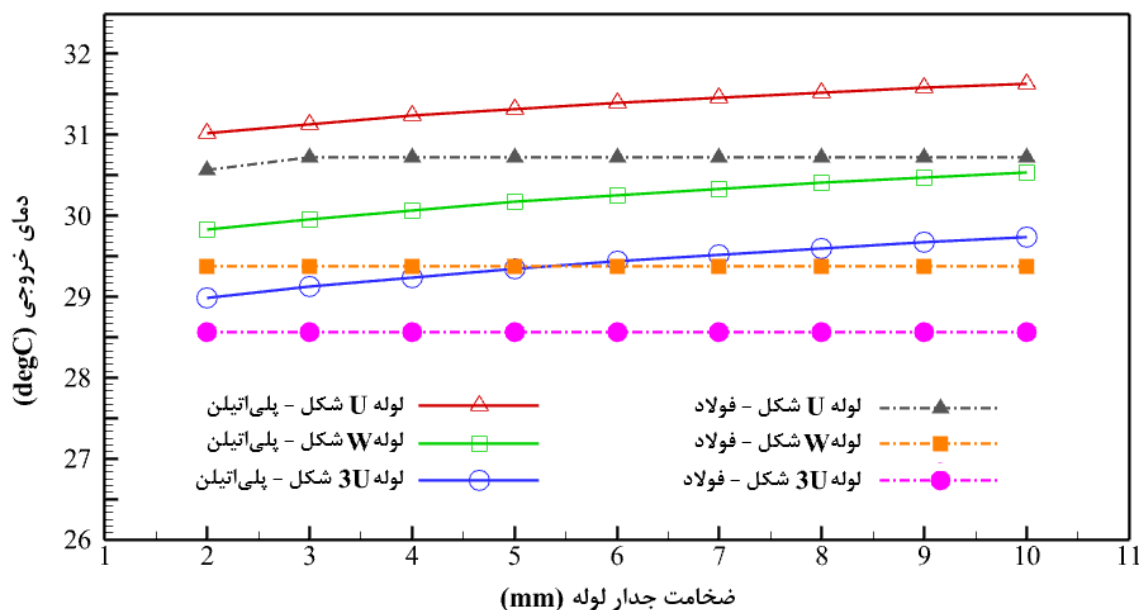
Fig. 9. Diagram of the effect of changes in pile length on pile energy output temperature in three different tube placement positions: U, W, and 3U.

هدایت حرارتی که برای لوله با جنس فولاد در نظر گرفته شده است برابر W/ ۴۵ mK می‌باشد. با توجه به شکل، سیال خروجی از لوله‌های فولادی به نسبت لوله‌های پلی‌اتیلنی به ترتیب در لوله U شکل ۲/۸٪، W شکل ۲/۶٪ و 3U شکل ۲/۲٪ دمای پایین‌تری دارد که نشانگر عملکرد حرارتی بهتر لوله‌های فولادی نسبت به لوله‌های پلی‌اتیلنی است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که در لوله با جنس پلی‌اتیلن، با افزایش ضخامت لوله دمای خروجی آب نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت لوله از ۲ mm تا ۱۶ mm در لوله U شکل ۲٪، در لوله W شکل ۲/۴٪ و در لوله 3U شکل ۲/۶٪ افزایش دما مشاهده می‌شود. این افزایش دما به این دلیل اتفاق می‌افتد که ضریب هدایت حرارتی لوله کمتر از آب و بتن است و افزایش ضخامت آن موجب افت عملکرد حرارتی شمع می‌شود. اما در لوله فولادی با افزایش ضخامت جدار لوله تغییر محسوسی در عملکرد حرارتی شمع انرژی مشاهده نمی‌گردد که دلیل این اتفاق می‌تواند بزرگ بودن ضریب هدایت حرارتی فولاد باشد. ضمناً در راهنمای طراحی و ساخت سیستم شمع انرژی [۳۳] پیشنهاد شده است که در لوله‌های پلی‌اتیلنی نسبت قطر لوله به ضخامت جداره لوله بیشتر از ۱۱ نباشد تا لوله بتواند حداقل فشاری برابر ۱۱۰۰ kPa که می‌تواند معادل فشار ناشی از بتن تازه باشد را تحمل کند.

۱۰ m الی ۷۰ m در نرم افزار مدل شدند. شکل ۹ نتایج خروجی از نرم‌افزار را به ازای طول‌های مختلف شمع انرژی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان متوجه شد که با افزایش طول شمع دمای آب خروجی از شمع کاهش می‌یابد. نرخ این کاهش در لوله 3U شکل بیشتر از دو حالت دیگر است. در لوله 3U شکل با افزایش طول شمع از ۱۰ m به ۲۰ m، دما به اندازه‌ی ۷/۵٪ کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش طول شمع از ۶۰ m به ۷۰ m دما تنها به اندازه ۴/۶٪ کاهش می‌یابد. این درصد برای لوله W شکل به ترتیب ۶٪ و ۴/۳٪ و برای لوله U شکل ۴٪ و ۳/۴٪ است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که با افزایش بیشتر طول شمع، نرخ افت دما کاهش می‌یابد که این کاهش در لوله با تعداد U بیشتر، بیشتر خواهد بود.

۴-۴ اثر تغییرات ضخامت جدار و جنس لوله

در شکل ۱۰ تاثیر ضخامت لوله‌های مبدل گرما بر عملکرد حرارتی شمع انرژی قابل مشاهده است. در این بخش ضخامت لوله از ۲ mm تا ۱۶ mm متغیر است درحالی که قطر داخلی لوله ثابت و برابر ۱۶ mm است. همچنین جهت مقایسه اثر جنس لوله بر عملکرد حرارتی شمع انرژی، از دو نوع لوله پلی‌اتیلن و لوله فولادی در مدلسازی استفاده شده است. ضریب



شکل ۱۰. نمودار اثر تغییرات ضخامت جدار لوله بر دمای خروجی انرژی شمع در سه حالت مختلف قرارگیری لوله U، W و 3U برای لوله با جنس پلی اتیلن و فولاد

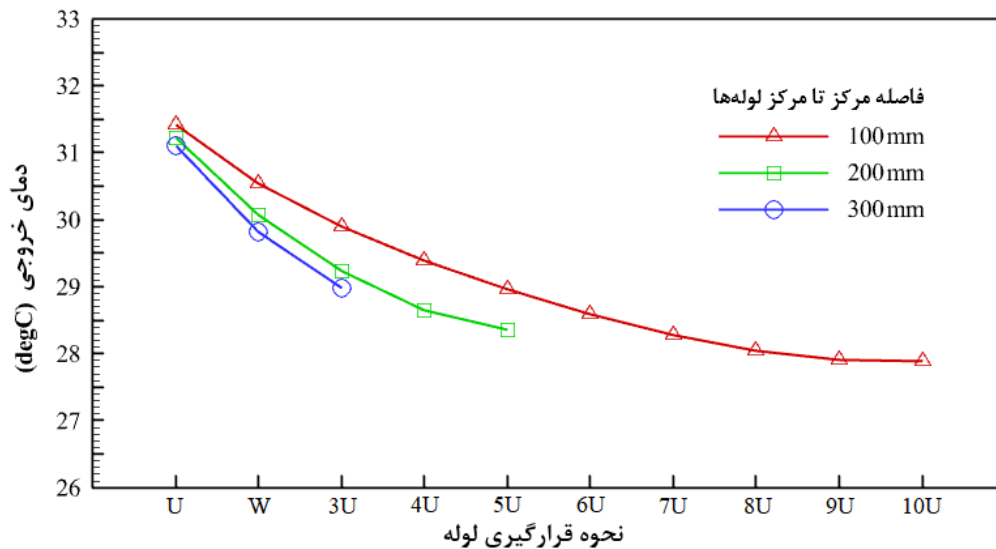
Fig. 10. Diagram of the effect of changes in pipe wall thickness on the energy output temperature of the pile in three different pipe positions: U, W, and 3U for pipes made of polyethylene and steel.

لوله‌ها از یکدیگر چگونه از ایجاد تداخل گرمایی جلوگیری می‌کند. افزایش فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها از ۱۰۰ mm به ۳۰۰ mm در لوله W، U و 3U شکل به ترتیب ۱٪، ۲/۴٪ و ۳/۲٪ افزایش راندمان شمع انرژی را همراه دارد.

نکته دیگر قابل ملاحظه در شکل ۱۱ این است که دمای آب خروجی از لوله 10U شکل با لوله 9U تقریباً برابر است و مقدار آن کمی از لوله 8U شکل کمتر می‌باشد. این درحالی است که طول لوله 10U شکل نسبت به لوله 8U شکل ۵۶ m بیشتر است. دلیل این موضوع نیز ناشی از تداخل حرارتی ایجاد شده بین لوله ورودی و لوله خروجی سیال است. لوله ورودی سیال دارای بالاترین دما در سیستم شمع انرژی است. وقتی لوله خروجی که حامل سیال خنک شده است، درست در کنار لوله ورودی واقع می‌شود تداخل گرمایی بین لوله ورودی و خروجی باعث می‌شود که دمای سیال خنک شده در لوله ورودی مجدداً دچار افزایش دما شود و راندمان شمع انرژی کاهش پیدا کند. شکل ۱۲ در-ز نشان‌دهنده حرارت در سطح و اطراف شمع به ترتیب در لوله 8U، 9U و 10U با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm می‌باشد. در شکل ۱۲ مشخص است که چگونه در لوله 10U شکل، دمای سیال در لوله خروجی تحت تاثیر حرارت لوله ورودی قرار دارد و در لوله 8U شکل با

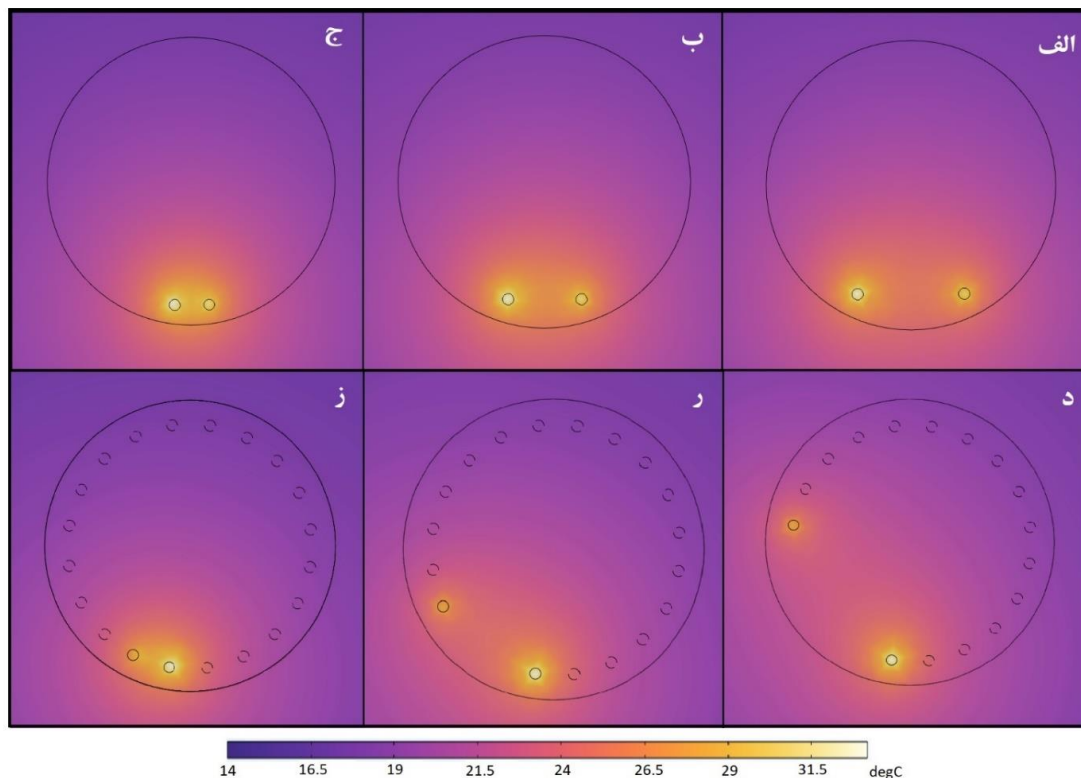
۴-۵- اثر تغییرات فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها با یکدیگر

فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی یک شمع انرژی بگذارد. در شکل ۱۱ این موضوع با بکارگیری از سه مدل مختلف بررسی شده است. فاصله‌ی مرکز تا مرکز لوله‌ها در حالت اول ۱۰۰ mm، در حالت دوم ۲۰۰ mm و در حالت سوم ۳۰۰ mm در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه ضخامت پوشش بتن بر روی لوله‌ها ۷۰ mm می‌باشد بنابراین در حالت اول که فاصله بین لوله‌ها ۱۰۰ mm است نهایتاً می‌توان لوله 10U شکل را بصورت سری در یک شمع با قطر ۸۰۰ mm ساخت. به همین ترتیب در حالت دوم با فاصله مرکز تا مرکز ۲۰۰ mm و حالت سوم با فاصله مرکز تا مرکز ۳۰۰ mm به ترتیب نهایتاً می‌توان لوله 5U شکل و 3U شکل را اجرا کرد. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با کمتر شدن فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها، عملکرد حرارتی شمع انرژی افت می‌کند. دلیل این اتفاق تداخل گرمایی لوله‌ها با یکدیگر است بصورتی که همواره یک لوله با دما بیشتر در کنار یک لوله با دمای کمتر قرار دارد و حرارت ایجاد شده توسط لوله گرم‌تر موجب افزایش دمای لوله مجاور می‌شود و این تداخل حرارتی باعث کاهش راندمان شمع انرژی می‌گردد. در شکل ۱۲ الف-ب-ج می‌توان مشاهده کرد که دورکردن



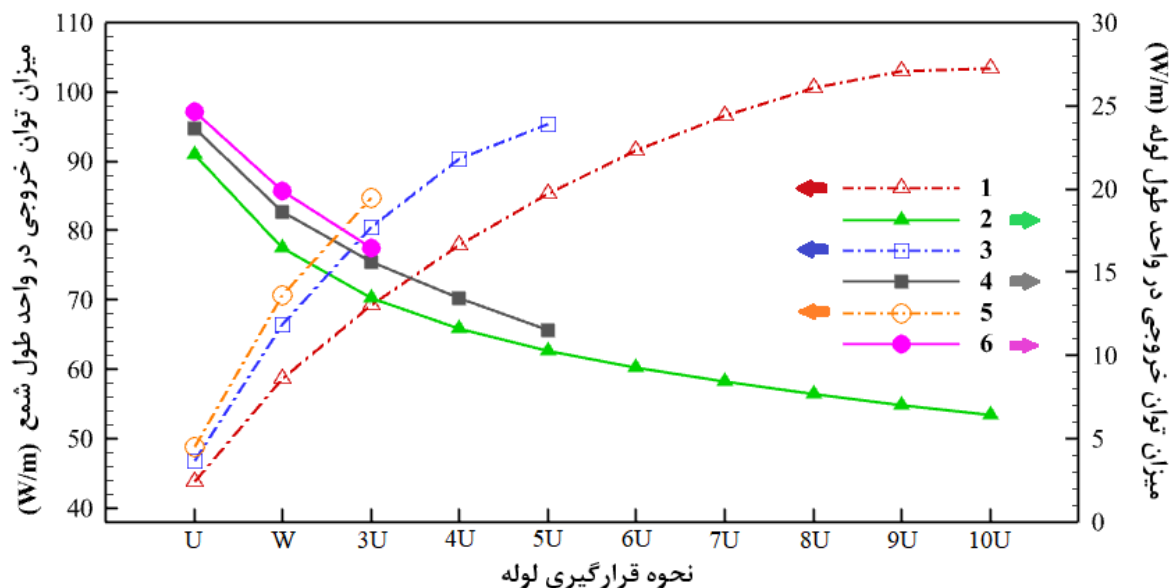
شکل ۱۱. نمودار اثر تغییرات فاصله مرکز تا مرکز لوله ها بر دمای خروجی انرژی شمع در حالت‌های مختلف قرارگیری لوله با سه فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر

Fig. 11. Diagram of the effect of changes in the center-to-center distance of the tubes on the energy output temperature of the pile in different positions of the tubes with three center-to-center distances of 100, 200, and 300 mm.



شکل ۱۲. نمودار حرارتی شمع انرژی از نمای بالا: الف) لوله U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۳۰۰ mm؛ ب) لوله U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۲۰۰ mm؛ ج) لوله U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm؛ د) لوله ۸U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm؛ ر) لوله ۹U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm؛ ز) لوله ۱۰U شکل با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm

Fig. 12. Thermal diagram of the energy pile from the top view: a) U-shaped tube with a center-to-center distance of 300 mm; b) U-shaped tube with a center-to-center distance of 200 mm; c) U-shaped tube with a center-to-center distance of 100 mm; d) 8U-shaped tube with a center-to-center distance of 100 mm; e) 9U-shaped tube with a center-to-center distance of 100 mm; f) 10U-shaped tube with a center-to-center distance of 100 mm



شکل ۱۳. نمودار میزان گرمای مبادله شده در سیستم شمع انرژی در حالات مختلف قرار گیری لوله ۱) در واحد طول شمع با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm (۱؛ ۲۰۰) در واحد طول لوله با فاصله مرکز تا مرکز ۱۰۰ mm (۳؛ ۲۰۰) در واحد طول شمع با فاصله مرکز تا مرکز ۲۰۰ mm (۴؛ ۳۰۰) در واحد طول لوله با فاصله مرکز تا مرکز ۲۰۰ mm (۵؛ ۳۰۰) در واحد طول شمع با فاصله مرکز تا مرکز ۳۰۰ mm (۶؛ ۳۰۰)

Fig. 13. Diagram of the amount of heat exchanged in the energy pile system in different pipe placement situations: 1) per pile length unit with a center-to-center distance of 100 mm; 2) per pipe length unit with a center-to-center distance of 100 mm; 3) per pile length unit with a center-to-center distance of 200 mm; 4) per pipe length unit with a center-to-center distance of 200 mm; 5) per pile length unit with a center-to-center distance of 300 mm; 6) per pipe length unit with a center-to-center distance of 300 mm

این افزایش و کاهش به مرور افت می‌کند. دلیل این افت می‌تواند ناشی از افزایش طول لوله و همچنین تداخل حرارتی بیشتر لوله‌ها با یکدیگر باشد. همچنین با دقت به نمودار می‌توان دریافت که میزان گرمای مبادله شده در واحد طول شمع لوله 10U و 9U با یکدیگر برابر است ولی میزان گرمای مبادله شده لوله 10U از لوله 9U کمتر است که مجدداً نشان‌دهنده تاثیر نزدیکی لوله ورودی و خروجی شمع انرژی به یکدیگر است. از طرف دیگر با توجه به شکل هرچه میزان فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها از یکدیگر بیشتر باشد، هردو نمودار به سمت بالا حرکت می‌کند که مجدداً به معنای افزایش بازدهی شمع انرژی می‌باشد.

۴-۶- مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد حرارتی شمع انرژی

در میان تمام روش‌های طراحی تجربی موجود، مناسب‌ترین روش آن است که در عین ساده بودن، کارآمد، قوی و تطبیق‌پذیر باشد که روش تاگوچی همه‌ی این ویژگی‌ها را در مسائل مهندسی دارد. گام اولیه در بررسی به روش تاگوچی تعریف یک ماتریس متعامد مناسب است. ماتریس متعامد

ایجاد فاصله بین لوله ورودی و خروجی سیال تداخل حرارتی بسیار کاهش می‌یابد.

جهت بررسی دقیق‌تر و مقایسه بهتر شکل‌های مختلف قرارگیری لوله‌ها و فاصله مرکز تا مرکز آن‌ها، از دو تعریف "میزان گرمای مبادله شده در واحد متر طول شمع" و "میزان گرمای مبادله شده در واحد متر طول لوله" استفاده می‌شود که از تقسیم رابطه ۱۲ بر طول شمع و طول لوله بدست می‌آیند و واحد هر دو W/m می‌باشد. این دو تعریف کمک می‌کند تا قضاوت بهتری از عملکرد حرارتی شمع انرژی بدست آید. هرچه میزان گرمای مبادله شده در واحد طول شمع و طول لوله بیشتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر است. در شکل ۱۳ مقادیر این دو تعریف به ازای شکل‌های مختلف قرارگیری لوله‌ها بیان شده است. اولین نکته‌ای که از این شکل دریافت می‌شود این است که رابطه‌ی خطی بین میزان گرمای مبادله شده در واحد طول شمع و لوله با افزایش U لوله‌ها وجود ندارد. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد U های لوله‌ها، میزان گرمای مبادله شده در واحد طول شمع افزایش می‌یابد اما مقدار گرمای مبادله شده در واحد طول لوله در حال کاهش است و نرخ

جدول ۵. ماتریس آرایه‌های متعامد L8 تاگوچی [۳۴].

Table 5. Taguchi L8 orthogonal array matrix [34].

شماره مدلسازی	شماره پارامتر						
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۲
۳	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۲
۴	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۱
۵	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲
۶	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۱
۷	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱
۸	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲

جدول ۶. پارامترها و سطوح انتخاب شده جهت مطالعه آماری.

Table 6. Parameters and levels selected for statistical study.

سطح ۲	سطح ۱	متغیر
۳۰۰	۱۰۰	فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (mm)
3U شکل	U شکل	نحوه قرارگیری لوله
۱۸	۸	دمای دامنه خاکی [۳۵]
۱/۲	۰/۲	سرعت جریان سیال داخل لوله (m/s)
۳۲	۱۶	سایز لوله
۳۰	۱۰	طول شمع (m)
۰/۴۲	۴۵	جنس لوله (W/m.K)

است که از هر سطح در هر ستون به تعداد برابری در ستون‌های دیگر نیز وجود دارد. یک پارامتر تاثیر زیادی بر نتیجه خروجی خواهد داشت در صورتی که پاسخ حاصل از یکی از سطوح‌های آن تفاوت زیادی با پاسخ حاصل از سطوح‌های دیگرش داشته باشد. با توجه به خاصیت تعامد، در تمامی پارامترها هر یک از سطوح‌ها به تعداد برابری به ازای آن پارامتر رخ می‌دهند [۳۴].

هفت پارامتر انتخاب شده جهت بررسی و مقایسه عبارتند از فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها، نحوه قرارگیری لوله‌ها، دمای دامنه خاکی، سرعت جریان داخل لوله، سایز لوله تبادل حرارت، طول شمع و جنس لوله می‌باشند که مقادیر سطوح انتخاب شده برای هر یک از پارامترها در جدول ۶ قابل ملاحظه است. انتخاب این پارامترها و رنج تغییرات آن‌ها بر اساس مطالعه ادبیات فنی و پژوهش‌های تجربی بوده و کاربرد عملی و اجرایی آن‌ها نیز مدنظر بوده است. به عنوان مثال در پارامتر سایز لوله، از لوله‌هایی که در استاندارد

یک ماتریس دو بعدی است که میزان پارامترها در هر آزمایش مورد نیاز (در این مطالعه مدلسازی عددی) را تعریف می‌کند. جدول ۵ آرایه‌های متعامد استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. هر سطر از درایه‌های این ماتریکس میزان هر یک از متغیرها را در یک آزمایش (مدلسازی) مشخص می‌کند. هر ستون از آرایه‌های این ماتریکس مربوط به مقادیر یک پارامتر است و مقادیری که این پارامتر در تمام آزمایشات (مدلسازی‌ها) می‌تواند داشته باشد را نمایش می‌دهد. از این رو مقادیر داخل هر ستون در هر سطر به سطح آن پارامتر که در آزمایش عددی استفاده شده است اشاره دارد [۳۴].

یکی از مشخصه‌های مهم آرایه متعامد "استقلال آماری" آن است. در هر ستون این ماتریکس تعداد رخداد برابری برای هر سطح هر متغیر وجود دارد. همچنین ستون‌ها بصورت متقابل نیز متعامد هستند که به این معنا

1. Orthogonal array

جدول ۷. سایز لوله‌های پلی‌اتیلن طبق استاندارد DIN 8074 و ISO 4427 تحت فشار اسمی 16bar.

Table 7. Polyethylene pipe sizes according to DIN 8074 and ISO 4427 standards under nominal pressure of 16 bar.

قطر داخلی mm	ضخامت mm	سایز لوله
۱۱/۴	۲/۳	۱۶
۱۵/۴	۲/۳	۲۰
۱۹/۴	۲/۸	۲۵
۲۴/۸	۳/۶	۳۲
۳۱	۴/۵	۴۰

جدول ۸. مقادیر تعیین شده پارامترهای مختلف در هر مدل‌سازی.

Table 8. The determined values of various parameters in each modeling.

شماره مدل‌سازی	فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (mm)	نحوه قرارگیری لوله‌ها	دمای محیط خاکی	سرعت جریان داخل لوله $(\frac{m}{s})$	سایز لوله	طول شمع (m)	جنس لوله (W/m.K)	توان خروجی (W)	
								روز ۵ ام	روز ۶۰ ام
۱	۱۰۰	U	۸	۰/۲	۱۶	۱۰	۴۵	۳۹۲	۲۶۷
۲	۱۰۰	U	۸	۱/۲	۳۲	۳۰	۰/۴۲	۱۲۴۴	۸۰۲
۳	۱۰۰	3U	۱۸	۰/۲	۱۶	۳۰	۰/۴۲	۱۴۱۱	۱۰۳۶
۴	۱۰۰	3U	۱۸	۱/۲	۳۲	۱۰	۴۵	۱۰۳۷	۶۸۸
۵	۳۰۰	U	۱۸	۰/۲	۳۲	۱۰	۰/۴۲	۴۴۹	۲۱۴
۶	۳۰۰	U	۱۸	۱/۲	۱۶	۳۰	۴۵	۱۴۲۲	۶۴۴
۷	۳۰۰	3U	۸	۰/۲	۳۲	۳۰	۴۵	۳۹۳۷	۳۷۹۶
۸	۳۰۰	3U	۸	۱/۲	۱۶	۱۰	۰/۴۲	۱۲۱۸	۱۱۸۸

بررسی بهتر خروجی‌ها باید پردازش‌های آماری بر روی نتایج صورت پذیرد تا اثر هر یک از پارامترها مطرح شده بر روی متغیر هدف (میزان گرمای مبادله شده در سیستم) مشخص گردد. این امر با انجام محاسبه سطح میانگین^۱ انجام شده است. این روش تحلیل شامل: ۱- محاسبه کردن نتیجه خروجی بطور میانگین برای هر سطح از هر پارامتر، ۲- محاسبه کردن اثر هر پارامتر بر پارامتر هدف با تعیین میزان اختلاف بین نتیجه خروجی میانگین بین دو سطح آن پارامتر، ۳- مشخص کردن قدرت تاثیر هر پارامتر و رتبه بندی اثر آن به ترتیب از بزرگترین تا کوچکترین تفاضل بدست آمده، می‌باشد [۳۶]. نتایج محاسبه سطح میانگین که برای دو بازه زمانی عنوان شده در جدول ۹ نشان داده شده‌اند.

DIN 8074 و ISO 4427 برای لوله‌های پلی‌اتیلن با تراکم بالا با فشار اسمی ۱۶ bar تعریف شده‌اند، جهت انتخاب سطوح (کران پایین و کران بالا) پارامتر سایز لوله استفاده شده است که مشخصات تعدادی از این لوله‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. همچنین پارامتر جنس لوله در این مطالعه استفاده شده است که کران پایین مربوط به لوله با جنس پلی‌اتیلن و کران بالا مربوط به لوله با جنس فولادی است که مقدار ضریب هدایت حرارتی مناسب برای هریک از آن‌ها لحاظ گردیده است. جدول ۸ مقادیر هر پارامتر در هر مدل‌سازی و نتایج خام خروجی در هر مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

مدلسازی‌ها در بازه‌ی زمانی ۶۰ روزه انجام شده‌اند و دو بازه زمانی روز ۵ ام و روز ۶۰ ام به ترتیب به عنوان نماینده عملکرد حرارتی کوتاه مدت و بلند مدت سیستم شمع انرژی برای مطالعه انتخاب شدند. جهت تحلیل و

1. Level average analysis

جدول ۹. رتبه‌بندی پارامترهای مختلف بر اساس تاثیرگذاری در توان خروجی شمع انرژی در کوتاه و بلند مدت.

Table 9. Ranking of various parameters based on their impact on the output power of the energy pile in the short and long term.

فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها	نحوه قرارگیری لوله‌ها	دمای دامنه خاکی	سرعت جریان داخل لوله	سایز لوله	طول شمع	جنس لوله
روز ۵ام						
به ازای سطح ۱ (W)	۱۰۲۱	۸۷۷	۱۶۹۸	۱۵۴۸	۷۷۴	۱۶۹۷
به ازای سطح ۲ (W)	۱۷۵۷	۱۹۰۱	۱۰۸۰	۱۲۳۰	۲۰۰۴	۱۰۸۱
تفاضل (اثر)	۷۳۵	۱۰۲۴	۶۱۸	۳۱۷	۵۵۶	۶۱۶
رتبه اثرگذاری	۳	۲	۴	۷	۶	۵
روز ۶۰ام						
به ازای سطح ۱ (W)	۶۹۸	۴۸۲	۱۵۱۳	۱۳۲۸	۵۸۹	۱۳۴۹
به ازای سطح ۲ (W)	۱۴۶۱	۱۶۷۷	۶۴۶	۸۳۰	۱۵۶۹	۸۱۰
تفاضل (اثر)	۷۶۳	۱۱۹۵	۸۶۷	۴۹۸	۹۸۰	۵۳۹
رتبه اثرگذاری	۴	۱	۳	۷	۵	۶

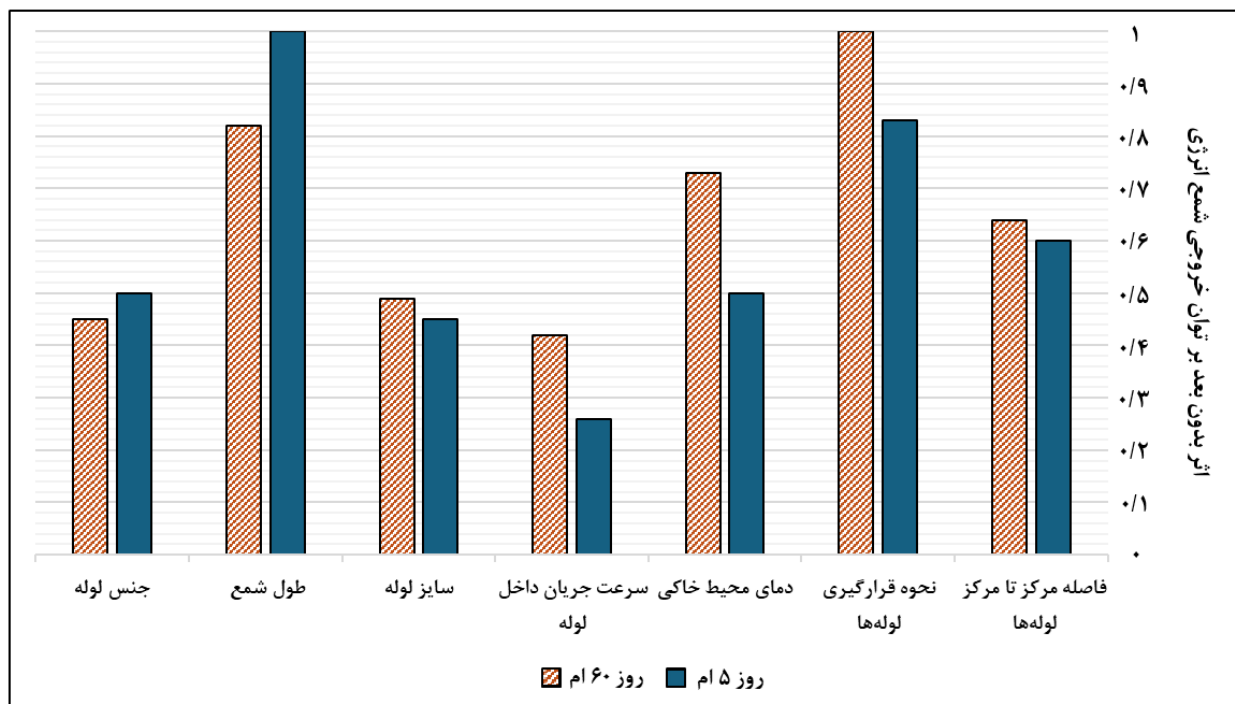
جنس لوله و همچنین پارامترهای فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها و دمای دامنه خاکی اثرگذاری نزدیک به یکدیگر بر توان خروجی شمع انرژی دارند. با توجه بیشتر به شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که اثرگذاری دمای دامنه خاکی در بلند مدت نسبت به کوتاه مدت بیش از ۵۰٪ افزایش داشته است. این موضوع می‌تواند به این سبب باشد که در کوتاه مدت هنوز سیستم به تعادل گرمایی کامل نرسیده است و با گذشت زمان و نزدیک شدن به شرایط تعادل گرمایی، میزان دمای دامنه‌خاکی اثرگذاری بیشتری بر توان خروجی شمع انرژی خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییرات پارامترهای مختلف اعم از سرعت جریان، طول شمع، قطر و ضخامت لوله‌ها و... بر عملکرد حرارتی شمع انرژی با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی المان محدود بررسی شد. جهت انجام این پژوهش از لوله‌های تبادل گرما U شکل استفاده شده است که بصورت سری در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. مدل ساخته شده با مطالعات پیشین عددی و تجربی صحت سنجی شد و برای انجام بررسی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از مطالعه آماری تاگوچی جهت مقایسه اثر هر پارامتر بر توان خروجی شمع انرژی نیز استفاده شده است. در ادامه قسمتی از مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش بیان شده است:

با توجه به جدول ۹، در کوتاه مدت به ترتیب طول شمع انرژی، نحوه قرارگیری لوله‌های تبادل حرارت و فاصله مرکز تا مرکز لوله‌های تبادل حرارت، مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر توان خروجی شمع انرژی می‌باشند. در بلند مدت نیز به ترتیب سه پارامتر نحوه قرارگیری لوله‌های تبادل حرارت، طول شمع و دمای دامنه خاکی بیشترین تاثیر را بر توان خروجی شمع انرژی دارند. برخلاف انتظار تغییرات سرعت جریان داخل لوله از تاثیرگذاری کمتری نسبت به دیگر پارامترها برخوردار است که می‌تواند ناشی از تغییر در رژیم جریان در اثر تغییر سرعت باشد. از طرفی با توجه به شکل ۵ مشاهده شد که به ازای سرعت‌های کم جریان داخل لوله، دمای سیال خروجی از شمع انرژی کاهش می‌یابد اما مطابق رابطه (۱۲)، کاهش سرعت موجب کاهش دبی ورودی شده که در نتیجه باعث کاهش توان خروجی از سیستم شمع انرژی می‌گردد. اثر کم سرعت جریان بر توان خروجی شمع انرژی با نتایج بدست آمده از مطالعات سسیناتو و لاوریچ [۱۰] و همچنین هریدی و همکاران [۱۱] نیز همخوانی دارد.

در شکل ۱۴ نمودار اثر بدون بعد هر یک از پارامترهای مطرح شده بر توان خروجی شمع انرژی قابل مشاهده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در کوتاه مدت پارامترهای دمای محیط خاکی و جنس لوله تقریباً به اندازه‌ی نصف و پارامتر سایز لوله کمی کمتر از نصف پارامتر طول شمع بر توان خروجی اثرگذار هستند. در بلند مدت نیز تاثیرگذاری پارامترهای سایز و



شکل ۱۴. نمودار اثر بدون بعد پارامترهای مختلف بر توان خروجی شمع انرژی.

Fig. 14. Diagram of the dimensionless effect of various parameters on the output power of the energy pile.

شکل ۲۷٪ کاهش و در لوله 3U شکل ۳۱٪ کاهش را تجربه می‌کند که بخش بیشتر این کاهش دما در تغییرات طول‌های کوتاه‌تر شمع رخ می‌دهد. همچنین با افزایش طول شمع، میزان گرمای مبادله شده در واحد طول شمع نیز کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. این مقدار برای لوله 3U شکل با تغییر طول شمع از ۱۰ m به ۷۰ m به بیش از ۴۵٪ می‌رسد در حالی که برای لوله U شکل این عدد همان ۲۰٪ است.

۳- افزایش قطر لوله با توجه به ثابت بودن سرعت جریان موجب افزایش دمای سیال خروجی از شمع انرژی می‌گردد. در قطرهای خیلی کوچک و خیلی بزرگ، عملکرد حرارتی شمع انرژی مستقل از طول لوله می‌باشد. با این حال در قطرهای بزرگ میزان گرمای مبادله شده با افزایش طول لوله، افزایش می‌یابد. بطور مثال در قطر لوله ۴۲ mm با وجود اینکه دمای خروجی در لوله U شکل تنها ۱/۶٪ از لوله 3U بیشتر است، میزان گرمای مبادله شده در لوله 3U، ۸۸٪ بزرگتر از لوله U شکل می‌باشد.

۴- افزایش ضخامت لوله پلی اتیلن موجب افزایش دمای خروجی سیال از شمع انرژی می‌شود. بطور مثال در لوله U شکل با افزایش ضخامت لوله از ۲ mm به ۱۰ mm، دمای خروجی سیال به اندازه‌ی ۲٪ افزایش می‌یابد.

۱- افزایش سرعت جریان سیال در شمع انرژی منجر به افزایش دمای خروجی سیال می‌گردد. رابطه‌ی بین سرعت جریان و دمای خروجی یک رابطه خطی نیست و با افزایش سرعت نرخ افزایش دمای سیال خروجی کاهش می‌یابد و در سرعت‌های بالا عملاً تغییر محسوسی در دمای خروجی سیال مشاهده نمی‌شود. همچنین در سرعت‌های پایین با افزایش تعداد U ها بصورت سری در لوله شمع انرژی، کاهش دمای قابل توجهی در دمای خروجی سیال مشاهده می‌شود درحالی که در سرعت‌های بالا این تفاوت بین لوله‌ها با U های مختلف ناچیز است. همچنین مشاهده شد که با تغییر سرعت جریان از ۱ m/s به ۵ m/s دمای خروجی سیال در لوله U شکل ۳۰٪، در لوله W شکل ۴۳٪ درصد و در لوله 3U شکل ۵۲٪ افزایش پیدا می‌کند. این درصورتی است که با همین تغییر در سرعت جریان، میزان گرمای مبادله شده بین سیال و محیط اطراف در لوله U شکل ۳۸٪، در لوله W شکل ۵۴٪ و در لوله 3U شکل ۶۶٪ افزایش می‌یابد.

۲- تغییر طول شمع انرژی تاثیر قابل توجهی در دمای خروجی سیال از سیستم شمع انرژی دارد. مشاهده شد که با تغییر طول شمع از ۱۰ m به ۷۰ m دمای خروجی سیال در لوله U شکل ۲۰٪ کاهش، در لوله W

for implementation of energy piles in Iran based on the lessons learned from the developed countries experiences, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140 (2021).

- [5] L. Laloui, M. Nuth, L. Vulliet, Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 30(8) (2006) 763-781.
- [6] 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.
- [7] F. Loveridge, W. Powrie, D. Nicholson, Comparison of two different models for pile thermal response test interpretation, *Acta Geotechnica*, 9 (2014) 367-384.
- [8] 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.
- [9] S.L. Abdelaziz, C.G. Olgun, I. Martin, James R, Design and operational considerations of geothermal energy piles, in: *Geo-frontiers 2011: Advances in geotechnical engineering*, 2011, pp. 450-459.
- [10] F. Cecinato, F.A. Loveridge, Influences on the thermal efficiency of energy piles, *Energy*, 82 (2015) 1021-1033.
- [11] S. Haridy, K. Alnaqbi, A. Radwan, M.G. Arab, Optimizing the thermal performance of energy piles using response surface methodology, *Case Studies in Thermal Engineering*, 41 (2023) 102637.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

هر چند افزایش ضخامت موجب کم شدن راندمان شمع انرژی می شود ولی نباید مقدار آن از حدی کمتر باشد که نتواند فشارهای وارده از طرف بتن تازه را تحمل کند.

۵- فاصله مرکز تا مرکز لوله ها از یکدیگر و جلوگیری از ایجاد تداخل گرمایی و کاهش اثر آن می تواند کمک بسیار بزرگی به بهبود عملکرد شمع انرژی کند. افزایش فاصله مرکز تا مرکز لوله ها از ۱۰۰ mm به ۳۰۰ mm در لوله 3U شکل، موجب کاهش دما به اندازه ی ۳/۲٪ می شود. همچنین در لوله های 10U و 9U بدلیل نزدیک بودن لوله خروجی که حامل سیال خنک شده است به لوله ورودی که دارای بیشترین دما است، بدلیل ایجاد تداخل حرارتی بین این دو لوله عملکرد حرارتی شمع بسیار تحت شعاع قرار می گیرد و باعث افت بازدهی شمع انرژی می شود.

۶- با استفاده از مطالعه آماری تاگوچی مشخص شد که مهم ترین پارامترهای تاثیرگذار بر توان خروجی شمع انرژی که باید مورد توجه طراحان و علاقمندان به استفاده از این سیستم باشد، در کوتاه مدت به ترتیب طول شمع، نحوه قرارگیری لوله های تبادل حرارت و فاصله مرکز تا مرکز لوله ها است. در بلندمدت نیز به ترتیب پارامترهای نحوه قرارگیری لوله های تبادل حرارت، طول شمع و دمای دامنه خاکی بیشترین تاثیر را بر توان خروجی شمع انرژی دارند. علاوه بر این تغییر فاصله مرکز تا مرکز لوله ها در بلند مدت نیز تاثیر قابل توجه ۶۰ درصدی نسبت به تاثیرگذارترین پارامتر دارد. همچنین برخلاف انتظار تغییرات سرعت جریان تاثیر کمتری نسبت به دیگر پارامترها بر توان خروجی دارد.

منابع

- [1] P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, Global warming of 5/1 C, An IPCC, (2018).
- [2] IEA, Direct CO₂ emissions from buildings-related heating by fuel in the Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-emissionsfrom-buildings-related-heating-by-fuel-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>, IEA. Licence: CC BY 0/4.
- [3] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski, F. Haghighat, A review on energy piles design, sizing and modelling, *Energy*, 122 (2017) 390-407.
- [4] D.Y. Cherati, O. Ghasemi-Fare, Practical approaches

- of Geometrical Misplacement of Heat Exchanger Pipe Parallel Configuration in Energy Piles, *Energies*, 17(11) (2024) 2580.
- [25] H. Ayaz, M. Faizal, A. Bouazza, Energy, economic, and carbon emission analysis of a residential building with an energy pile system, *Renewable Energy*, 220 (2024) 119712.
- [26] S.W. Churchill, Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes, (1977).
- [27] T.Y. Ozudogru, C.G. Olgun, A. Senol, 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers, *Geothermics*, 51 (2014) 312-324.
- [28] M.V. Lurie, Modeling of oil product and gas pipeline transportation, in: *Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation*, 2009, pp. 1-214.
- [29] V. Gnielinski, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *International chemical engineering*, 16(2) (1976) 359-367.
- [30] R. Caulk, E. Ghazanfari, J.S. McCartney, Parameterization of a calibrated geothermal energy pile model, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 5 (2016) 1-15.
- [31] S. You, X. Cheng, H. Guo, Z. Yao, In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers, *Energy and buildings*, 79 (2014) 23-31.
- [32] H. Park, S.-R. Lee, S. Yoon, J.-C. Choi, Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation, *Applied Energy*, 103 (2013) 12-24.
- [33] 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.
- [34] Peace, Glen Stuart. "Taguchi methods: a hands-on approach." (No Title) (1993).
- [35] Sadeghi, Habibollah, and Rao Martand Singh. "Driven precast concrete geothermal energy piles: Current state of knowledge." *Building and environment* 228 (2023): 109790.
- [15] 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).
- [16] 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) 6-6.
- [17] Z. Mohamad, F. Fardoun, F. Meftah, A review on energy piles design, evaluation, and optimization, *Journal of Cleaner Production*, 292 (2021) 125802.
- [18] B. Liang, M. Chen, Y. Orooji, Effective parameters on the performance of ground heat exchangers: A review of latest advances, *Geothermics*, 98 (2022) 102283.
- [19] P. Cui, W. Yang, W. Zhang, K. Zhu, J.D. Spitler, M. Yu, Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives, *Energy and Built Environment*, 5(2) (2024) 255-269.
- [20] S. Park, C. Sung, K. Jung, B. Sohn, A. Chauchois, H. Choi, Constructability and heat exchange efficiency of large diameter cast-in-place energy piles with various configurations of heat exchange pipe, *Applied thermal engineering*, 90 (2015) 1061-1071.
- [21] 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.
- [22] W. Yang, P. Lu, Y. Chen, Laboratory investigations of the thermal performance of an energy pile with spiral coil ground heat exchanger, *Energy and Buildings*, 128 (2016) 491-502.
- [23] A. Carotenuto, P. Marotta, N. Massarotti, A. Mauro, G. Normino, Energy piles for ground source heat pump applications: Comparison of heat transfer performance for different design and operating parameters, *Applied Thermal Engineering*, 124 (2017) 1492-1504.
- [24] Q.I. Alqawasmeh, G.A. Narsilio, N. Makasis, Impact

- [36] Di Donna, Alice, Francesco Cecinato, Fleur Loveridge, and Marco Barla. "Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering 170, no. 3 (2017): 232-245.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Sobhdam, M. M. Ahmadi, Numerical modeling and analysis of the effect of different parameters on the efficiency and thermal performance of energy piles, Amirkabir J. Civil Eng., 57(5) (2025) 793-820.

DOI: [10.22060/ceej.2025.22644.8013](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.22644.8013)



