

## Implementation and Field Evaluation of the Thermal Performance of Cast-in-Place Concrete Energy Piles in Iran's Hot Semi-Arid Climate: A Case Study of Fardis County, Alborz Province

Mohammad Javadikhah<sup>✉</sup><sup>ID</sup><sup>1</sup>, Mohammad Mehdi Ahmadi<sup>ID</sup><sup>2</sup>

1. M.Sc., Geotechnical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: [mohammadjavadikhah1379@gmail.com](mailto:mohammadjavadikhah1379@gmail.com)
2. Ph.D., Geotechnical Engineering, 2000, University of British Columbia, Vancouver, Canada. Email: [mmahmadi@sharif.edu](mailto:mmahmadi@sharif.edu)

### ARTICLE INFO

### Abstract

**Article type:**  
Research Paper

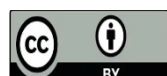
**Article history:**  
Received: July 27, 2026  
Revised: August 27, 2026  
Accepted: September 21, 2026  
Published online:  
September 23, 2026

### Keywords:

Energy pile, Ground heat exchanger, Heat transfer, Renewable energy, Energy efficiency

Energy piles, as one of the emerging technologies in the field of renewable energy, integrate the structural performance of foundation piles with the heat exchange capability with the ground, offering an effective solution for providing heating and cooling of buildings and reducing energy consumption in the construction industry. The application of this technology not only reduces dependence on fossil fuels but also enhances energy efficiency, lowers operational costs, and decreases environmental pollutant emissions. Despite the growing use of energy piles in many countries worldwide, information regarding the performance of these systems under Iran's geological and climatic conditions remains limited. Therefore, this study aims to experimentally evaluate the thermal performance of full-scale energy piles, investigate the influence of design parameters on heat transfer rates, and propose an optimal configuration to enhance system efficiency under Iranian climatic conditions. In this research, a 16-meter-deep test borehole was constructed, and seven different energy pile configurations were designed and implemented by varying the arrangement and specifications of the heat exchanger tubes. The system performance was assessed under summer operation conditions (heat injection into the ground).

**How to cite:** Javadikhah, M. & Ahmadi, M. M. (2026). Implementation and Field Evaluation of the Thermal Performance of Cast-in-Place Concrete Energy Piles in Iran's Hot Semi-Arid Climate: A Case Study of Fardis County, Alborz Province. *Geography and Regional Planning*, 16(3), 177-196. <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594083.4510>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights  
DOI: <https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594083.4510>

**Publisher:** Qeshm Institute of Higher Education

## Introduction

Buildings consume a substantial share of energy, particularly for heating and cooling. Energy piles offer a low-carbon solution by combining the structural function of foundation piles with shallow geothermal heat exchange. Although this technology has been investigated in Europe and East Asia, its field performance under Iran's geological, construction, and climatic conditions remains poorly documented. This gap is especially important in hot semi-arid regions, where summer cooling demand is high and the national energy system faces recurring imbalances between energy supply and consumption.

This study aimed to implement and experimentally evaluate a full-scale cast-in-place concrete energy pile in Fardis County, Alborz Province, Iran. It specifically examined the pile's heat-transfer capacity under summer operating conditions and assessed the effects of heat-exchanger pipe material, diameter, arrangement, spacing, and installation depth. The ultimate objective was to identify effective configurations that could improve the thermal efficiency and practical applicability of energy piles in future Iranian building projects.

## Methods

A 16 m deep and 0.80 m diameter test pile was constructed within an actual building project. Seven heat-exchanger configurations were attached to the reinforcement cage before concreting. The investigated variables included high-density polyethylene and five-layer pipes; pipe diameters of 16, 20, and 25 mm; U-shaped and W-shaped arrangements; installation depths of 8 and 16 m; and center-to-center distances of 30 and 60 cm between the inlet and outlet branches.

The full-scale hydraulic testing system comprised two 300 L tanks for controlling and stabilizing the inlet-water temperature, a three-speed circulation pump providing flow rates of approximately 3–20 L/min, an FD-100 magnetic flowmeter, and calibrated PT100 resistance temperature detectors. The sensors continuously recorded inlet and outlet fluid temperatures and soil temperatures at different depths. Water was used as the principal working fluid, while a mixture

containing 70% water and 30% antifreeze was considered when freezing protection was required.

Summer operation was simulated by circulating heated fluid through the embedded pipes and rejecting heat to the surrounding ground. Heat-transfer rates were calculated from the measured flow rate and inlet–outlet temperature difference using an energy balance based on the first law of thermodynamics. Eleven summer tests were used to compare the seven designs under different inlet-temperature and flow-rate conditions.

## Results

The ground-temperature profiles demonstrated that seasonal fluctuations decreased rapidly with depth. Below approximately 7.5 m, the soil temperature remained nearly stable at about 16°C, confirming that most of the 16 m pile was positioned within a thermally stable zone suitable for sustained heat exchange.

The useful heat-transfer capacity generally ranged from approximately 1.5 to 6.0 kW, depending on the pipe configuration, flow rate, inlet temperature, and operating conditions. A greater temperature difference between the inlet fluid and surrounding soil increased the amount of transferred energy. Increasing the flow rate generally improved the heat-transfer capacity; however, excessively high flow rates reduced fluid residence time and decreased the temperature difference between the inlet and outlet.

Pipe characteristics substantially affected thermal performance. Five-layer pipes achieved higher thermal efficiency than HDPE pipes under comparable conditions, which was attributed to their multilayer structure and more favorable thermal conductivity. Increasing the pipe diameter from 16 to 25 mm noticeably improved heat transfer by enlarging the exchange surface, reducing hydraulic losses, and improving internal flow conditions. Consequently, the 25 mm pipe provided the highest heat-transfer capacity among the tested diameters.

The W-shaped configuration outperformed the U-shaped configuration because it provided a larger effective contact area, more

uniform flow distribution, and less thermal interference between the supply and return branches. Conversely, increasing the spacing between the two branches of the U-shaped pipe from 30 to 60 cm produced no meaningful improvement, and the observed difference remained within the experimental uncertainty. Increasing the installation depth from 8 to 16 m substantially enhanced performance because a larger portion of the heat exchanger was located within the stable-temperature zone.

### Conclusion

The field results demonstrate that cast-in-place concrete energy piles can provide meaningful ground heat rejection in the hot semi-arid climate of Fardis. Their thermal performance is highly sensitive to heat-

exchanger design, especially pipe material, diameter, arrangement, and installation depth. The best overall performance was associated with greater installation depth, larger-diameter pipes, five-layer pipe material, and a W-shaped configuration.

Nevertheless, because five-layer pipes are more expensive, large-diameter HDPE pipes may provide a practical and economical alternative for many construction projects. Although a single energy pile cannot generally meet the entire thermal demand of a building, multiple energy piles integrated into a foundation could supply a significant portion of heating and cooling loads, reduce fossil-fuel consumption, and support the development of energy-efficient and environmentally sustainable buildings in Iran.

### Ethical considerations

#### Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

#### Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

#### Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Third author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting

data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Fourth author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

#### Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

#### Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

#### Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



انجمن ژئوپلیتیک ایران

## فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲-۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲-۲۷۸۳

Homepage: <https://www.jgeoqeshm.ir/>



### ارزیابی میدانی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی بتنی درجا در اقلیم گرم و نیمه‌خشک

#### ایران: مطالعه موردی شهرستان فردیس، استان البرز

محمد جوادی‌خواه<sup>۱</sup>✉، محمد مهدی احمدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>نویسنده مسئول. کارشناسی ارشد، ژئوتکنیک، صنعتی شریف، ایران، تهران. رایانامه: [mohammadjavadiikhah1379@gmail.com](mailto:mohammadjavadiikhah1379@gmail.com)

<sup>۲</sup>دکترای مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه بریتیش کلمبیا، ونکوور، کانادا. رایانامه: [mmahmadi@sharif.edu](mailto:mmahmadi@sharif.edu)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                                      | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b></p> <p>شمع انرژی، مبدل حرارتی<br/>زمین‌گرمایی، انتقال حرارت،<br/>انرژی‌های تجدیدپذیر،<br/>بهره‌وری انرژی</p> | <p>هدف این پژوهش ارزیابی تجربی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی در مقیاس واقعی، بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر میزان انتقال حرارت و ارائه آرایش بهینه برای افزایش راندمان سیستم در شرایط اقلیمی ایران است. در این تحقیق، یک چاه آزمایشی به عمق ۱۶ متر اجرا و هفت طرح مختلف شمع انرژی با تغییر در آرایش و مشخصات لوله‌های مبدل حرارتی طراحی و اجرا شد. عملکرد سیستم در شرایط بهره‌برداری تابستانی (تزریق حرارت به زمین) مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، دمای آب ورودی توسط دو مخزن مجزا کنترل شد و دمای آب ورودی، خروجی و همچنین تغییرات دمای خاک در اعماق مختلف به‌صورت پیوسته ثبت و پایش گردید. سپس نرخ انتقال حرارت با استفاده از روابط ترمودینامیکی مبتنی بر قانون اول ترمودینامیک محاسبه و عملکرد طرح‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که توان گرمایشی و سرمایشی سامانه در محدوده ۱۵۰۰ تا ۵۰۰۰ وات قرار دارد و تغییر پارامترهای طراحی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی شمع انرژی دارد. همچنین استفاده از لوله‌های پنج‌لایه نسبت به سایر انواع لوله موجب افزایش راندمان انتقال حرارت شد، اجرای شمع با عمق ۱۶ متر عملکرد بهتری نسبت به عمق ۸ متر از خود نشان داد و به‌کارگیری لوله با قطر ۲۵ میلی‌متر بیشترین میزان انتقال حرارت را در میان طرح‌های مورد بررسی فراهم کرد. بر اساس نتایج این پژوهش، انتخاب مناسب عمق شمع، نوع و قطر لوله‌های مبدل حرارتی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد سامانه داشته و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای توسعه کاربرد شمع‌های انرژی در پروژه‌های ساختمانی و کاهش مصرف انرژی در شرایط اقلیمی ایران مورد استفاده قرار گیرد.</p> |

**استناد:** جوادی‌خواه، محمد و احمدی، محمد مهدی. (۱۴۰۵). اجرا و ارزیابی میدانی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی بتنی درجا در اقلیم گرم و

نیمه‌خشک ایران: مطالعه موردی شهرستان فردیس، استان البرز. *جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای*، ۱۷۷-۱۹۶

<https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.594083.4510>



© نویسندگان.

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

## مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی و افزایش سطح رفاه موجب افزایش چشمگیر تقاضای جهانی برای انرژی شده است. این روند، وابستگی گسترده به سوخت‌های فسیلی را به دنبال داشته و پیامدهایی همچون افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا، گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر تبدیل کرده است. بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، بخش عمده انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از تولید و مصرف انرژی از منابع فسیلی است که سهم قابل توجهی در تخریب محیط‌زیست و تشدید تغییرات اقلیمی دارد [۱]. علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، نوسانات قیمت حامل‌های انرژی، محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش هزینه‌های تولید و انتقال انرژی، کشورها را به سمت توسعه فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. این فناوری‌ها علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها، نقش مهمی در افزایش امنیت انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و دستیابی به توسعه پایدار ایفا می‌کنند [۲،۳]. در میان فناوری‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از انرژی زمین‌گرمایی کم‌عمق به دلیل پایداری دمای زمین در اعماق کم، قابلیت بهره‌برداری مداوم، عدم وابستگی به شرایط جوی و بازده مناسب، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از روش‌های نوین بهره‌برداری از این منبع انرژی، استفاده از شمع‌های انرژی است. شمع انرژی نوعی پی عمیق است که علاوه بر ایفای نقش سازه‌ای در انتقال بار ساختمان، به عنوان مبدل حرارتی نیز عمل کرده و از طریق گردش سیال در لوله‌های مدفون در داخل شمع، امکان تبادل حرارت میان ساختمان و زمین را فراهم می‌کند. این فناوری بدون نیاز به حفاری‌های مستقل برای نصب مبدل‌های حرارتی زمین‌گرمایی، هزینه‌های اجرایی را کاهش داده و از فضای موجود فونداسیون برای تولید انرژی بهره می‌گیرد. به همین دلیل، شمع‌های انرژی به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها و افزایش بهره‌وری سیستم‌های گرمایش و سرمایش شناخته می‌شوند.

اهمیت این فناوری در کشورهایی مانند ایران دوچندان است. اگرچه ایران از بزرگ‌ترین دارندگان ذخایر نفت و گاز جهان محسوب می‌شود، اما وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، فرسودگی زیرساخت‌های تولید و انتقال انرژی، اتلاف بالای انرژی، افزایش تقاضا در بخش ساختمان، محدودیت منابع آبی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و کاهش سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین انرژی، چالش‌های جدی در بخش انرژی کشور ایجاد کرده است [۴،۵]. در سال‌های اخیر، افزایش مصرف برق در فصل تابستان و مصرف گاز طبیعی در فصل زمستان موجب عدم تعادل میان تولید و مصرف انرژی شده و در بسیاری از مواقع شبکه انرژی کشور را با محدودیت مواجه کرده است. بنابراین، بهره‌گیری از فناوری‌هایی که بتوانند بخشی از بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان‌ها را بدون مصرف مستقیم سوخت‌های فسیلی تأمین کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ایران محسوب می‌شود و سهم قابل توجهی از انرژی مصرفی این بخش به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی اختصاص دارد. بسته به شرایط اقلیمی، نوع ساختمان، کیفیت عایق‌بندی، نوع تجهیزات مکانیکی و الگوی مصرف ساکنان، بیش از نیمی از انرژی مصرفی ساختمان صرف ایجاد آسایش حرارتی می‌شود [۶]. از این رو، افزایش راندمان سیستم‌های تأمین گرمایش و سرمایش می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد. در این میان، استفاده از شمع‌های انرژی به دلیل بهره‌گیری هم‌زمان از عملکرد سازه‌ای و عملکرد حرارتی، یکی از راهکارهای امیدوارکننده برای افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های جدید محسوب می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه شمع‌های انرژی، هنوز چالش‌های متعددی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها وجود دارد. عملکرد حرارتی شمع انرژی به عوامل متعددی نظیر شرایط زمین‌شناسی، خواص حرارتی خاک، سطح آب زیرزمینی، عمق شمع، قطر شمع، نوع بتن، نوع و جنس لوله‌های مبدل حرارتی، قطر لوله، فاصله بین لوله‌ها، آرایش لوله‌ها، سرعت جریان سیال و شرایط بهره‌برداری وابسته است. تغییر هر یک از این پارامترها می‌تواند میزان انتقال حرارت و راندمان سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر، بسیاری از دستورالعمل‌های طراحی موجود بر پایه مطالعات انجام‌شده در کشورهای اروپایی و شرق آسیا تدوین شده‌اند و به دلیل تفاوت‌های اقلیمی، زمین‌شناسی و اجرایی، تعمیم مستقیم آن‌ها به شرایط ایران با عدم قطعیت همراه است. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌های انجام‌شده بر مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی رایانه‌ای

یا آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که تعداد مطالعات مبتنی بر آزمایش‌های مقیاس واقعی، به‌ویژه در شرایط اقلیمی ایران، بسیار محدود است. علاوه بر این، کمتر پژوهشی به مقایسه هم‌زمان چندین آرایش مختلف لوله‌های مبدل حرارتی در شرایط عملیاتی یکسان پرداخته است. در نتیجه، هنوز اطلاعات کافی برای انتخاب مناسب‌ترین آرایش لوله، نوع لوله و عمق بهینه شمع انرژی در پروژه‌های اجرایی کشور وجود ندارد و این موضوع یکی از خلأهای اصلی تحقیقات موجود به شمار می‌رود.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف رفع این خلأ، عملکرد حرارتی شمع انرژی را در مقیاس واقعی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در این تحقیق، یک شمع انرژی با عمق ۱۶ متر اجرا شده و هفت آرایش مختلف لوله‌های مبدل حرارتی در آن مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد سیستم در دو شرایط سرمایش و گرمایش شبیه‌سازی شده و با اندازه‌گیری پیوسته دمای آب ورودی، دمای آب خروجی و تغییرات دمای خاک، نرخ انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک محاسبه شده است. در ادامه، عملکرد حرارتی طرح‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و تأثیر پارامترهایی نظیر نوع لوله، قطر لوله، آرایش لوله‌ها و عمق شمع بر میزان تبادل حرارت مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی بهینه شمع‌های انرژی، افزایش راندمان سامانه‌های زمین‌گرمایی و توسعه کاربرد این فناوری در پروژه‌های ساختمانی ایران باشد و مسیر استفاده گسترده‌تر از انرژی‌های تجدیدپذیر در بخش ساختمان را هموار سازد.

### روش انجام تحقیق

به‌منظور ارزیابی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی، یک سامانه آزمایشگاهی در مقیاس واقعی طراحی و اجرا شد. در این پژوهش، ابتدا تجهیزات موردنیاز انتخاب و آماده‌سازی شدند و سپس آزمایش‌های انتقال حرارت در شرایط گرمایش و سرمایش انجام گرفت. فرآیند تحقیق شامل طراحی و اجرای شمع انرژی، نصب تجهیزات اندازه‌گیری، گردش کنترل‌شده سیال و ثبت پیوسته داده‌های دمایی و دبی جریان بود.

در مرحله نخست، یک چاه آزمایشی با عمق ۱۶ متر حفر و هفت آرایش مختلف از لوله‌های مبدل حرارتی در داخل قفسه آرماتور شمع اجرا شد تا تأثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد حرارتی سیستم مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از بتن‌ریزی و تکمیل شمع، تجهیزات هیدرولیکی و ابزار دقیق نصب شدند و سامانه برای انجام آزمایش‌ها آماده گردید.

به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد پمپ حرارتی، از دو مخزن ۳۰۰ لیتری استفاده شد. یک مخزن وظیفه تنظیم دمای سیال را بر عهده داشت و مخزن دوم سیال با دمای ثابت را به شمع انرژی پمپاژ می‌کرد. با استفاده از المنت حرارتی و یخ، دمای سیال برای شبیه‌سازی شرایط تابستان (تزریق حرارت به زمین) کنترل شد. استفاده از دو مخزن باعث شد دمای سیال ورودی در طول هر سیکل آزمایش ثابت بماند و شرایط یکسانی برای مقایسه طرح‌های مختلف فراهم شود. شکل ۱ نمای کلی مخازن مورد استفاده در سامانه آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- مخازن ۳۰۰ لیتری مورد استفاده در سامانه آزمایش

برای ایجاد گردش سیال در مدار، از یک پمپ سیرکولاتور سه‌سرعته استفاده شد که قابلیت تنظیم دبی در محدوده ۳ تا ۲۰ لیتر بر دقیقه را داشت. این ویژگی امکان بررسی اثر نرخ جریان بر میزان انتقال حرارت را فراهم کرد. پمپ انتخاب‌شده علاوه بر مصرف انرژی پایین و عملکرد پایدار، توانایی پمپاژ آب و همچنین مخلوط آب و ضدیخ را دارا بود و در یک محفظه محافظ در برابر شرایط محیطی نصب شد. مشخصات و نحوه نصب پمپ در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- پمپ سیرکولاتور و نحوه نصب آن در مدار هیدرولیکی

اندازه‌گیری دقیق دما یکی از مهم‌ترین بخش‌های این پژوهش بود. به همین منظور از حسگرهای RTD نوع PT100 به دلیل دقت بالا، پایداری مناسب، رفتار خطی و حساسیت کم نسبت به نویز استفاده شد. این حسگرها در مسیر ورودی و خروجی سیال و همچنین در اعماق مختلف خاک نصب شدند تا تغییرات دمای سیال و خاک به‌صورت هم‌زمان ثبت شود. برای افزایش قابلیت اطمینان نتایج، حسگرها پیش از نصب کالیبره شدند و از کابل‌های مقاوم در برابر رطوبت، خوردگی و تنش‌های مکانیکی استفاده شد. نمونه‌ای از حسگرهای به‌کاررفته در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- حسگرهای دمای PT100 مورد استفاده برای اندازه‌گیری دمای سیال و خاک

به منظور اندازه‌گیری نرخ جریان سیال، یک فلومتر مغناطیسی مدل FD-100 در مدار نصب شد. این تجهیز قابلیت اندازه‌گیری لحظه‌ای دبی و سرعت جریان را داشته و امکان ثبت داده‌ها برای تحلیل‌های بعدی را فراهم می‌کند. اطلاعات دبی در کنار اختلاف دمای ورودی و خروجی، مبنای محاسبه نرخ انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک قرار گرفت. به عنوان سیال عامل، در اغلب آزمایش‌ها از آب استفاده شد و در شرایطی که احتمال کاهش دما به زیر صفر وجود داشت، مخلوط ۷۰ درصد آب و ۳۰ درصد ضدیخ به کار گرفته شد تا از یخ‌زدگی مدار جلوگیری شود، بدون آنکه افت قابل توجهی در عملکرد پمپ ایجاد شود. در این پژوهش، عملکرد دو نوع لوله مبدل حرارتی شامل لوله پنج‌لایه و لوله پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) نیز مورد مقایسه قرار گرفت. این لوله‌ها به دلیل مقاومت مناسب در برابر خوردگی، طول عمر بالا، انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده در سامانه‌های زمین‌گرمایی انتخاب شدند. همچنین آرایش‌های مختلف نصب لوله‌ها بر روی قفسه آرماتور اجرا و اثر آن‌ها بر راندمان انتقال حرارت بررسی شد. نمونه‌ای از نصب لوله‌های مبدل بر روی قفسه شمع در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴- نصب لوله‌های مبدل حرارتی بر روی قفسه آرماتور شمع انرژی

در نهایت، آزمایش‌ها در دو حالت سرمایش و گرمایش انجام شد. در هر مرحله، دمای سیال ورودی و خروجی، دمای خاک و دبی جریان به صورت پیوسته ثبت شدند. سپس با استفاده از اختلاف دمای سیال و دبی اندازه‌گیری شده، نرخ انتقال حرارت محاسبه و

عملکرد هفت طرح مختلف شمع انرژی از نظر توان گرمایشی و سرمایشی با یکدیگر مقایسه شد. داده‌های حاصل، مبنای تحلیل اثر نوع لوله، قطر لوله، آرایش مبدل و عمق شمع بر عملکرد حرارتی سامانه قرار گرفت.

### روش انجام آزمایش

به‌منظور ارزیابی عملکرد حرارتی شمع‌های انرژی، یک سامانه آزمایشگاهی در مقیاس واقعی در یک پروژه ساختمانی واقع در شهرستان فردیس، استان البرز، طراحی و اجرا شد. با توجه به اینکه نوسانات فصلی دمای خاک عمدتاً در لایه‌های سطحی رخ می‌دهد، طول شمع ۱۶ متر انتخاب شد تا بخش عمده مبدل حرارتی در ناحیه با دمای نسبتاً پایدار زمین قرار گیرد. همچنین برای امکان اجرای هفت آرایش مختلف لوله‌های مبدل حرارتی، قطر شمع ۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. محل اجرای پروژه در شکل ۵ نشان داده شده است.

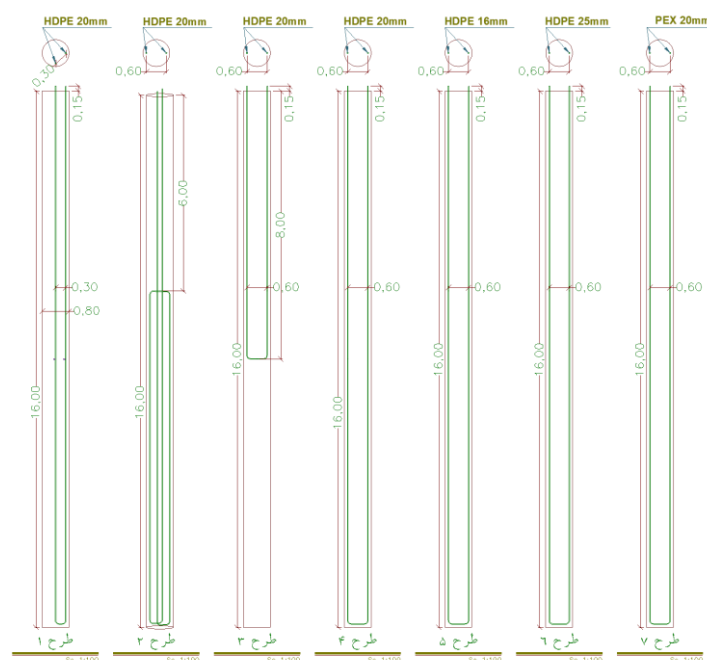


شکل ۵- محل اجرای پروژه (Site Location)

پیش از اجرای شمع، نمونه‌برداری از خاک در اعماق مختلف انجام و نتایج آزمایش دانه‌بندی برای شناسایی شرایط زمین‌شناسی محل مورد استفاده قرار گرفت. سپس با هدف بررسی اثر پارامترهای طراحی بر عملکرد حرارتی، هفت طرح مختلف مبدل حرارتی طراحی شد که در آن‌ها متغیرهایی شامل جنس لوله، قطر لوله، عمق نصب، آرایش لوله و فاصله بین لوله‌های رفت و برگشت تغییر داده شد. مشخصات کامل این طرح‌ها در جدول ۱ ارائه شده و آرایش هندسی آن‌ها در شکل ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات طرح‌های مختلف لوله‌گذاری

| شماره طرح | جنس لوله        | سایز لوله<br>(میلی‌متر) | آرایش لوله | عمق لوله (متر) | فاصله مرکز به مرکز لوله ورودی و<br>خروجی (سانتی‌متر) |
|-----------|-----------------|-------------------------|------------|----------------|------------------------------------------------------|
| ۱         | پلی اتیلن سنگین | ۲۰                      | U شکل      | ۱۶             | ۳۰                                                   |
| ۲         | پلی اتیلن سنگین | ۲۰                      | W شکل      | ۱۶             | ۶۰                                                   |
| ۳         | پلی اتیلن سنگین | ۲۰                      | U شکل      | ۸              | ۶۰                                                   |
| ۴         | پلی اتیلن سنگین | ۲۰                      | U شکل      | ۱۶             | ۶۰                                                   |
| ۵         | پلی اتیلن سنگین | ۱۶                      | U شکل      | ۱۶             | ۶۰                                                   |
| ۶         | پلی اتیلن سنگین | ۲۵                      | U شکل      | ۱۶             | ۶۰                                                   |
| ۷         | پنج لایه        | ۲۰                      | U شکل      | ۱۶             | ۶۰                                                   |



شکل ۶- آرایش‌های مختلف لوله‌گذاری

پس از طراحی، چاهی به عمق ۱۶ متر حفر شد و یک قفسه آرماتور متناسب با ابعاد شمع ساخته شد. لوله‌های مبدل حرارتی مطابق آرایش‌های طراحی شده بر روی قفسه نصب شدند و حسگرهای دمای PT100 در مسیر جریان سیال و همچنین در اعماق مختلف خاک نصب گردیدند تا امکان اندازه‌گیری هم‌زمان دمای سیال و زمین فراهم شود. نمایی از نصب لوله‌های مبدل حرارتی بر روی قفسه آرماتور در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- اجرای لوله‌ها روی قفسه آرماتور

پس از تکمیل مونتاژ، مجموعه قفسه و مبدل‌های حرارتی در داخل چاه قرار گرفت و عملیات بتن‌ریزی انجام شد. در ادامه، تجهیزات سطحی شامل دو مخزن ذخیره آب، پمپ سیرکولاتور، فلومتر دیجیتال و حسگرهای دمای ورودی و خروجی نصب شدند تا مدار

آزمایش تکمیل شود. این سامانه امکان کنترل دمای سیال، تنظیم دبی جریان و ثبت پیوسته داده‌های آزمایش را فراهم کرد. نمای کلی سامانه آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- سامانه آزمایش و تجهیزات روی زمین

به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد واقعی سامانه زمین‌گرمایی، آزمایش‌ها در دو حالت سرمایش و گرمایش انجام شدند. در حالت سرمایش، دمای سیال ورودی افزایش یافت تا فرآیند دفع حرارت به زمین شبیه‌سازی شود، در حالی که در حالت گرمایش، با کاهش دمای سیال ورودی، فرآیند استخراج انرژی از زمین مورد بررسی قرار گرفت. در هر دو حالت، دمای آب ورودی و خروجی، دمای خاک در اعماق مختلف و دبی جریان به‌صورت پیوسته ثبت شدند. در نهایت، با استفاده از اختلاف دمای سیال و دبی اندازه‌گیری‌شده، نرخ انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک محاسبه شد و عملکرد هفت طرح مختلف از نظر توان گرمایشی و سرمایشی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل، مبنای ارزیابی اثر نوع لوله، قطر لوله، آرایش مبدل و عمق نصب بر راندمان حرارتی شمع انرژی قرار گرفت.

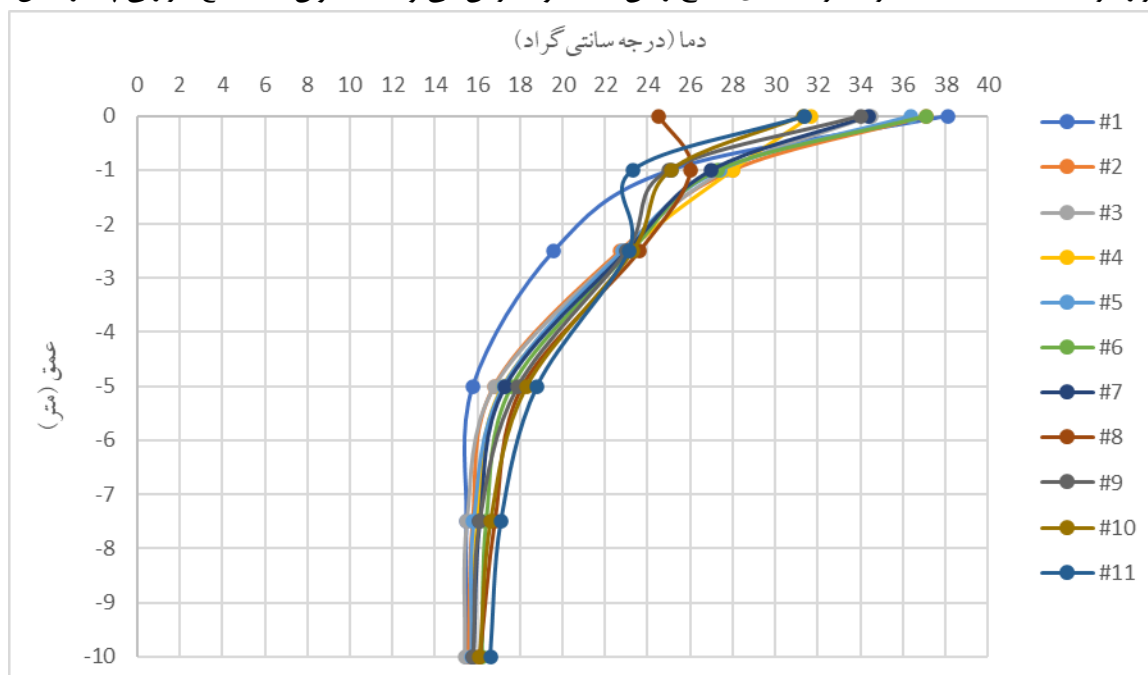
### نتایج انجام کار

در این پژوهش، عملکرد حرارتی شمع انرژی در شرایط بهره‌برداری شامل حالت سرمایش (تابستان) مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور ایجاد شرایط واقعی بهره‌برداری، مجموعاً ۱۸ آزمایش در بازه‌های زمانی مختلف انجام شد که مطابق جدول ۲، آزمایش‌های شماره ۱ تا ۱۱ به شرایط تابستانی اختصاص یافتند. در تمامی آزمایش‌ها دمای آب ورودی و خروجی، دبی جریان، دمای خاک در اعماق مختلف و توان تبادل حرارتی ثبت و بر اساس معادلات استخراج‌شده از قانون اول ترمودینامیک، نرخ انتقال حرارت محاسبه گردید.

جدول ۲- شماره‌گذاری آزمایشات

| شماره آزمایش | تاریخ آزمایش |
|--------------|--------------|
| #۱           | ۱۴۰۴/۰۵/۱۸   |
| #۲           | ۱۴۰۴/۰۶/۰۱   |
| #۳           | ۱۴۰۴/۰۶/۰۲   |
| #۴           | ۱۴۰۴/۰۶/۰۳   |
| #۵           | ۱۴۰۴/۰۶/۰۴   |
| #۶           | ۱۴۰۴/۰۶/۰۶   |
| #۷           | ۱۴۰۴/۰۶/۱۲   |
| #۸           | ۱۴۰۴/۰۶/۲۴   |
| #۹           | ۱۴۰۴/۰۶/۲۶   |
| #۱۰          | ۱۴۰۴/۰۶/۲۸   |
| #۱۱          | ۱۴۰۴/۰۷/۰۴   |

در این تحقیق فرض شد که سیال عامل تراکم‌ناپذیر بوده، تغییرات فشار در طول مبدل حرارتی ناچیز است و ظرفیت گرمایی ویژه آب در محدوده دمای آزمایش ثابت باقی می‌ماند. همچنین با محاسبه عدد رینولدز مشخص شد که جریان در اکثر آزمایش‌ها در محدوده گذرا تا آشفته قرار دارد، با این حال به دلیل ثابت بودن قطر لوله‌ها و کوچک بودن افت فشار، استفاده از معادله انرژی برای محاسبه نرخ انتقال حرارت کاملاً معتبر است. در ادامه نتایج عملکرد شمع انرژی در فصل تابستان ارایه خواهد شد. در بخش سرمایش، هدف بررسی توانایی شمع انرژی در انتقال گرمای ساختمان به خاک بود. در این حالت، آب با دمای بالا وارد لوله‌های مدفون در شمع شده و پس از تبادل حرارت با خاک، با دمای پایین‌تر از سیستم خارج گردید. بررسی پروفیل دمای خاک مطابق شکل ۹ نشان داد که نوسانات دمایی خاک با افزایش عمق به سرعت کاهش یافته و از عمق حدود ۷/۵ متر به پایین، دمای خاک تقریباً ثابت و نزدیک به ۱۶ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که بخش عمده طول شمع در ناحیه‌ای قرار گرفته است که تحت تأثیر تغییرات دمای سطح زمین نیست و بنابراین می‌تواند به عنوان یک منبع حرارتی پایدار عمل کند.



شکل ۹- پروفیل دمایی خاک تا عمق ۱۰ متری در تابستان

عملکرد حرارتی هفت طرح مختلف لوله‌گذاری در جداول ۳ تا ۹ ارائه شده است. این جداول شامل دبی جریان، دمای آب ورودی و خروجی، توان مصرفی پمپ و توان مفید انتقال حرارت هستند و مبنای مقایسه عملکرد طرح‌های مختلف را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، تغییرات دمای آب در هر یک از طرح‌ها در شکل‌های ۱۰ تا ۱۶ نمایش داده شده است که روند کاهش دمای آب در طول عبور از شمع انرژی را به خوبی نشان می‌دهند.

نتایج نشان داد که با افزایش اختلاف دمای آب ورودی و خاک، مقدار انرژی منتقل شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین در اکثر آزمایش‌ها، افزایش دبی جریان باعث افزایش توان انتقال حرارت شد، هرچند در دبی‌های بسیار زیاد، کاهش زمان اقامت سیال در داخل مبدل موجب کاهش اختلاف دمای ورودی و خروجی گردید. بر اساس داده‌های جداول ۶ تا ۱۲، توان مفید انتقال حرارت در شرایط تابستان بین حدود ۱۳۰۰ تا نزدیک ۵۹۰۰ وات متغیر بوده است که این اختلاف ناشی از تفاوت در نوع آرایش، جنس، قطر و عمق لوله‌ها و همچنین شرایط مختلف بهره‌برداری است.

جدول ۳- عملکرد سرمایشی طرح ۱ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۷           | ۶.۵                 | ۴۳.۳                         | ۳۵.۱                         | ۱۵۰                  | ۳۵۲۶.۱                |
| #۸           | ۱۱.۵                | ۳۰.۳                         | ۲۸.۲                         | ۱۸۰                  | ۱۴۸۵.۶                |
|              | ۸.۹                 | ۳۱.۳                         | ۲۷.۹                         | ۱۵۰                  | ۱۹۳۷.۰                |
|              | ۴.۶                 | ۳۱.۱                         | ۲۶.۵                         | ۹۰                   | ۱۳۶۹.۴                |
| #۹           | ۱۰.۳                | ۴۸.۷                         | ۴۲.۵                         | ۱۸۰                  | ۴۲۲۴.۴                |
|              | ۶.۴                 | ۴۹.۱                         | ۴۰.۹                         | ۱۵۰                  | ۳۴۶۹.۵                |
|              | ۱.۶                 | ۴۸                           | ۳۵.۳                         | ۹۰                   | ۱۳۱۱.۵                |
| #۱۰          | ۱۲.۳                | ۴۰.۶                         | ۳۶.۵                         | ۱۸۰                  | ۳۲۹۸.۲                |
|              | ۸.۱                 | ۴۰.۳                         | ۳۵.۷                         | ۱۵۰                  | ۲۴۱۹.۸                |
| #۱۱          | ۱۱.۲                | ۴۵.۴                         | ۴۰.۲                         | ۱۵۰                  | ۳۸۶۶.۸                |
|              | ۷                   | ۴۵.۵                         | ۳۸.۵                         | ۹۰                   | ۳۲۸۹.۵                |

جدول ۴- عملکرد سرمایشی طرح ۲ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۸           | ۹.۴                 | ۳۳                           | ۲۹                           | ۱۸۰                  | ۲۴۱۳.۳                |
|              | ۸.۵                 | ۳۳.۴                         | ۲۸.۵                         | ۱۵۰                  | ۲۷۲۲.۶                |
|              | ۴.۶                 | ۳۳.۴                         | ۲۷                           | ۹۰                   | ۱۹۴۰.۵                |
| #۹           | ۴.۸                 | ۵۱.۳                         | ۳۶.۱                         | ۹۰                   | ۴۹۴۲.۱                |
|              | ۸.۵                 | ۵۱                           | ۴۰.۷                         | ۱۵۰                  | ۵۸۸۸.۳                |
|              | ۹.۹                 | ۵۱.۳                         | ۴۲.۵                         | ۱۸۰                  | ۵۸۲۸.۷                |
| #۱۰          | ۷.۹                 | ۳۹.۹                         | ۳۲.۳                         | ۱۵۰                  | ۳۹۹۱.۰                |
|              | ۱۰.۶                | ۴۰.۱                         | ۳۴.۳                         | ۱۸۰                  | ۴۰۶۰.۳                |
| #۱۱          | ۷.۷                 | ۴۵.۹                         | ۳۵.۲                         | ۱۵۰                  | ۵۵۳۲.۴                |

جدول ۵- عملکرد سرمایشی طرح ۳ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۹           | ۱۲.۵                | ۳۹.۴                         | ۳۷.۳                         | ۱۸۰                  | ۱۶۳۰.۵                |
|              | ۸.۱                 | ۴۰.۶                         | ۳۵.۷                         | ۱۵۰                  | ۲۵۸۷.۴                |

|        |     |      |      |      |     |
|--------|-----|------|------|------|-----|
| ۳۰۴۳.۷ | ۱۸۰ | ۳۶.۵ | ۴۰.۳ | ۱۲.۳ | #۱۰ |
| ۲۹۶۱.۲ | ۹۰  | ۳۹.۱ | ۴۷   | ۵.۶  | #۱۱ |
| ۲۶۲۰.۵ | ۱۵۰ | ۴۳.۶ | ۴۷.۵ | ۱۰.۳ |     |

جدول ۶- عملکرد سرمایشی طرح ۴ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۶           | ۴.۳                 | ۳۹.۹                         | ۳۳.۸                         | ۹۰                   | ۱۷۱۹.۱                |
| #۹           | ۱۱                  | ۴۳.۳                         | ۳۸.۲                         | ۱۸۰                  | ۳۶۸۹.۲                |
|              | ۸.۵                 | ۴۰.۷                         | ۳۶.۲                         | ۱۵۰                  | ۲۴۸۸.۱                |
|              | ۳.۷                 | ۴۰.۱                         | ۳۲.۴                         | ۹۰                   | ۱۸۷۵.۰                |
| #۱۰          | ۸.۳                 | ۴۱.۱                         | ۳۵.۳                         | ۱۵۰                  | ۳۱۷۰.۲                |
|              | ۱۱.۶                | ۴۱.۵                         | ۳۷                           | ۱۸۰                  | ۳۴۲۰.۲                |
|              | ۱۲.۳                | ۴۱.۳                         | ۳۷.۲                         | ۱۸۰                  | ۳۲۹۸.۲                |
| #۱۱          | ۲                   | ۴۵.۸                         | ۲۵.۲                         | ۹۰                   | ۲۷۵۱.۶                |
|              | ۸.۸                 | ۴۶.۸                         | ۳۸.۳                         | ۱۵۰                  | ۵۰۰۹.۰                |
|              | ۱۱.۳                | ۴۷                           | ۴۰.۵                         | ۱۸۰                  | ۴۸۸۵.۸                |

جدول ۷- عملکرد سرمایشی طرح ۵ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۹           | ۹                   | ۴۰                           | ۳۵.۳                         | ۱۸۰                  | ۲۷۳۷.۴                |
|              | ۶.۵                 | ۳۹.۸                         | ۳۴.۵                         | ۱۵۰                  | ۲۲۲۶.۰                |
|              | ۲.۵                 | ۳۸.۶                         | ۲۹.۴                         | ۹۰                   | ۱۴۹۶.۳                |
| #۱۰          | ۸                   | ۴۳.۲                         | ۳۸.۲                         | ۱۸۰                  | ۲۵۷۸.۸                |
|              | ۶                   | ۴۳.۱                         | ۳۷.۴                         | ۱۵۰                  | ۲۲۰۸.۸                |
| #۱۱          | ۷.۳                 | ۴۵.۸                         | ۳۸.۵                         | ۱۵۰                  | ۳۵۲۵.۴                |
|              | ۹.۵                 | ۴۶.۱                         | ۳۹.۸                         | ۱۸۰                  | ۳۹۴۷.۹                |

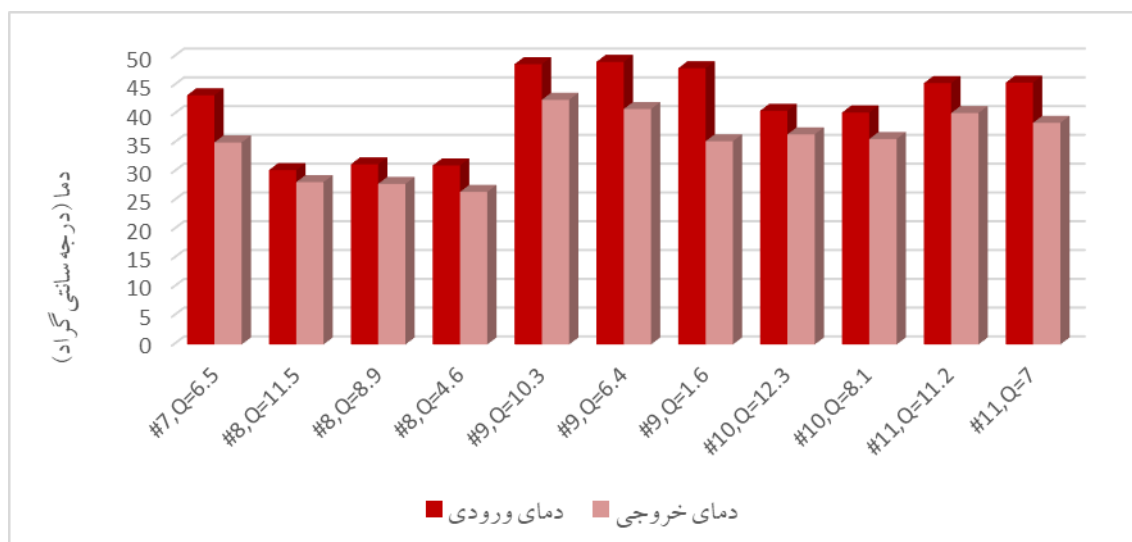
جدول ۸- عملکرد سرمایشی طرح ۶ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| #۹           | ۸                   | ۳۹.۷                         | ۳۳.۵                         | ۱۵۰                  | ۳۲۷۰.۹                |
|              | ۱۲.۵                | ۳۹.۷                         | ۳۵.۹                         | ۱۸۰                  | ۳۰۹۶.۱                |
|              | ۱۲.۸                | ۳۹.۸                         | ۳۶.۳                         | ۱۸۰                  | ۲۹۰۹.۹                |
| #۱۰          | ۰.۷                 | ۴۲                           | ۲۴.۵                         | ۹۰                   | ۷۵۴.۹                 |
|              | ۸.۶                 | ۴۳.۱                         | ۳۵.۳                         | ۱۵۰                  | ۴۴۷۶.۵                |
|              | ۱۴.۱                | ۴۲.۲                         | ۳۷                           | ۱۸۰                  | ۴۸۷۶.۹                |

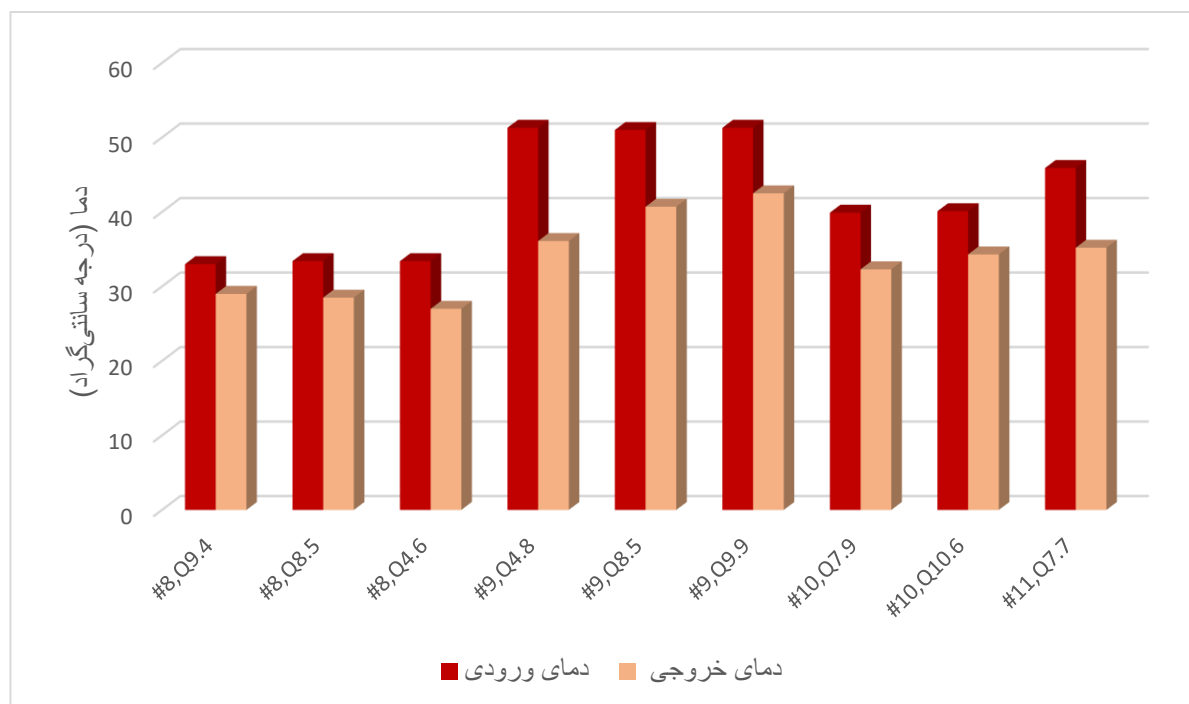
جدول ۹- عملکرد سرمایشی طرح ۷ در تابستان

| شماره آزمایش | دبی (لیتر بر دقیقه) | دمای ورودی (درجه سانتی‌گراد) | دمای خروجی (درجه سانتی‌گراد) | توان مصرفی پمپ (وات) | توان مفید سیستم (وات) |
|--------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
|              | ۲.۴                 | ۴۳.۲                         | ۳۳.۷                         | ۹۰                   | ۱۴۸۲.۵                |

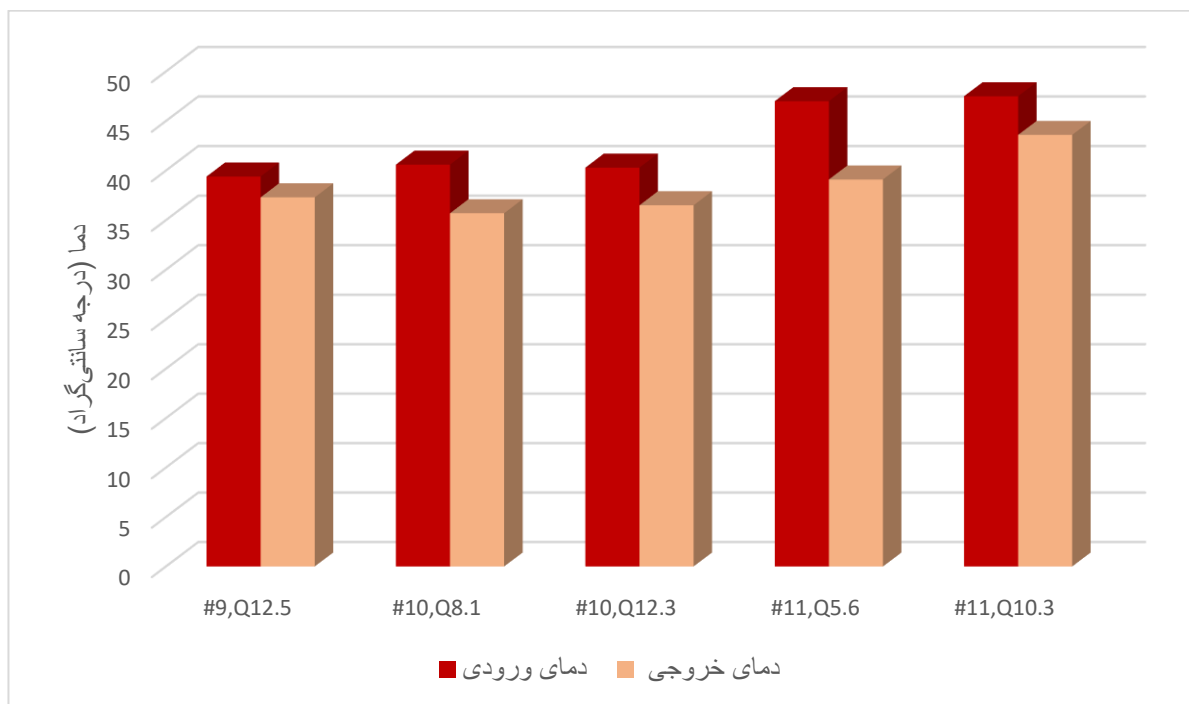
|        |     |      |      |      |     |
|--------|-----|------|------|------|-----|
| ۲۵۳۹.۸ | ۱۵۰ | ۳۸.۶ | ۴۳.۶ | ۷.۸  | #۹  |
| ۳۰۳۶.۸ | ۱۸۰ | ۳۹.۲ | ۴۳.۶ | ۱۰.۶ |     |
| ۲۷۱۷.۸ | ۱۵۰ | ۳۵.۶ | ۴۱   | ۷.۷  | #۱۰ |
| ۳۲۷۸.۲ | ۱۸۰ | ۳۶.۵ | ۴۱.۱ | ۱۰.۹ |     |
| ۴۱۱۰.۳ | ۱۵۰ | ۳۹.۴ | ۴۶.۵ | ۸.۷  | #۱۱ |
| ۴۰۶۸.۶ | ۱۸۰ | ۴۱.۳ | ۴۶.۸ | ۱۱.۲ |     |



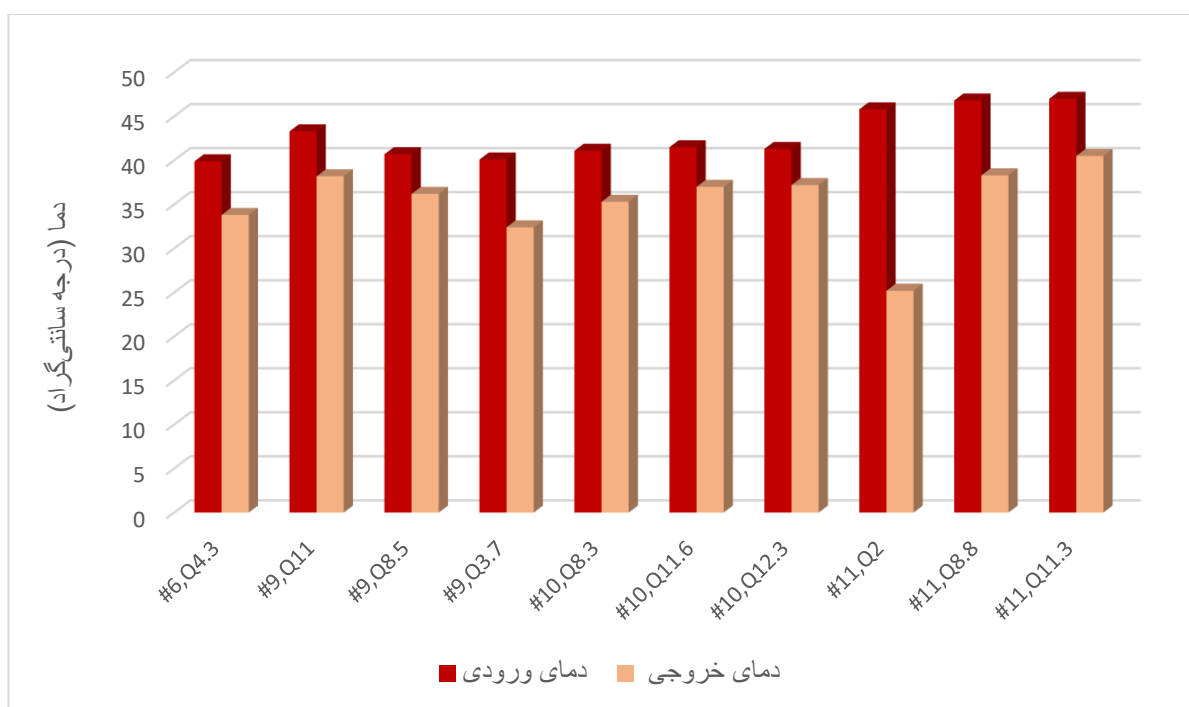
شکل ۱۰- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۱ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



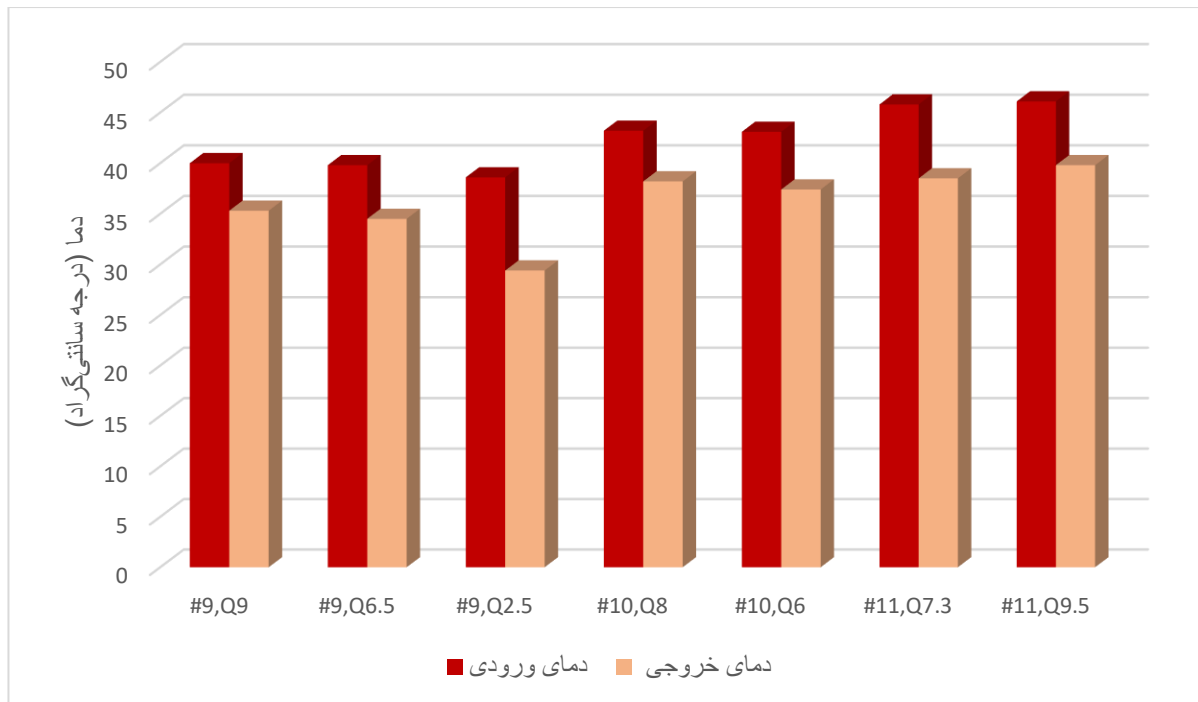
شکل ۱۱- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۲ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



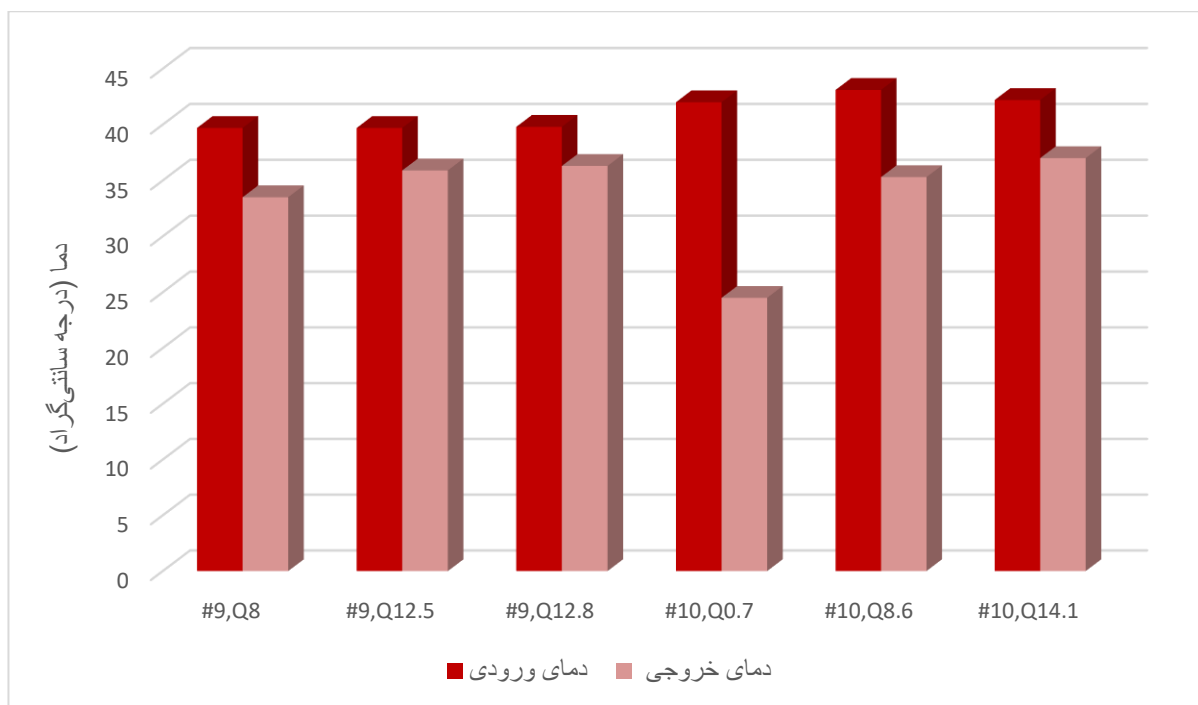
شکل ۱۲- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۳ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



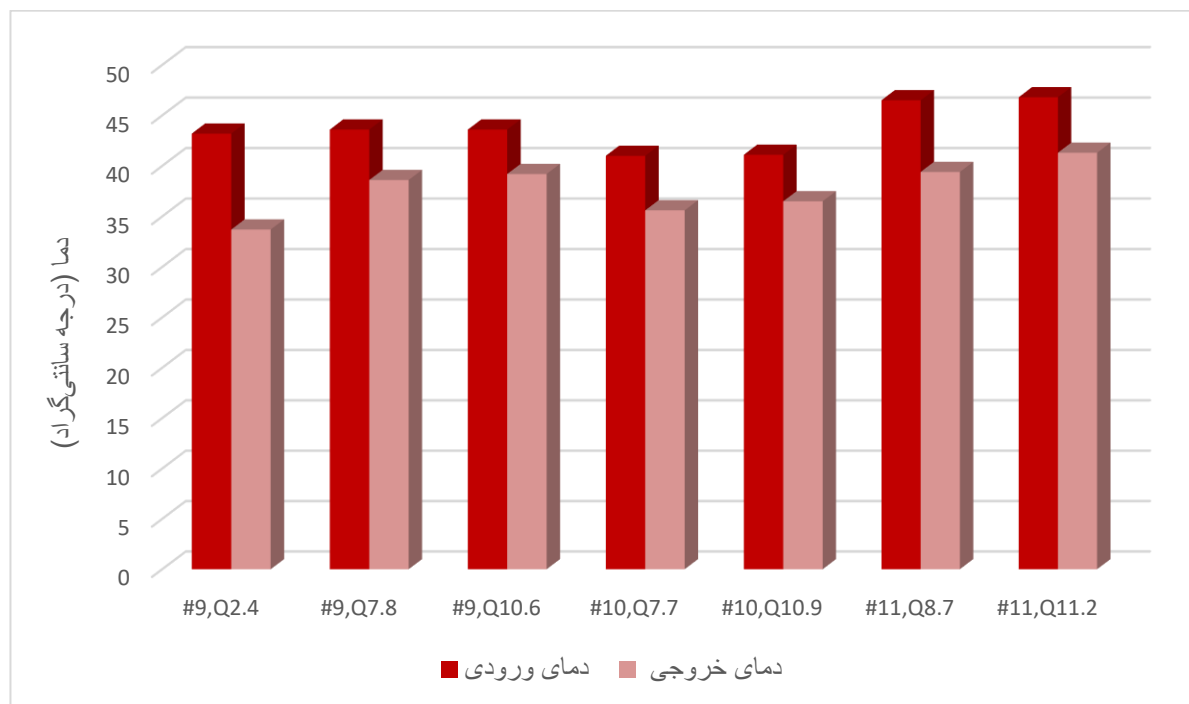
شکل ۱۳- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۴ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



شکل ۱۴- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۵ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



شکل ۱۵- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۶ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان



شکل ۱۶- نمودار دمای آب ورودی و خروجی طرح ۷ تحت دبی و دمای ورودی متفاوت در تابستان

در میان طرح‌های بررسی‌شده، طرح دوم و طرح چهارم در بسیاری از شرایط عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌ها نشان دادند، در حالی که طرح سوم به علت کاهش عمق لوله‌گذاری، کمترین میزان انتقال حرارت را ثبت کرد. همچنین مقایسه نمودارهای شکل‌های ۷۲ تا ۷۸ نشان می‌دهد که کاهش دمای آب در طرح‌های با سطح تبادل بیشتر محسوس‌تر بوده و این موضوع بیانگر افزایش راندمان انتقال حرارت در این طرح‌ها است.

بررسی هم‌زمان نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهد که شمع انرژی قادر است تبادل حرارتی قابل توجهی با زمین برقرار کند. حداقل توان مفید اندازه‌گیری‌شده در آزمایش‌ها حدود ۱۵۰۰ وات و بیشترین مقدار ثبت‌شده نزدیک به ۶۰۰۰ وات بوده است. اگرچه این میزان انرژی برای تأمین کامل بار حرارتی یک ساختمان کافی نیست، اما استفاده هم‌زمان از چند شمع انرژی می‌تواند سهم قابل توجهی از بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان را تأمین کرده و در نتیجه موجب کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای شود. در ادامه، به منظور تعیین مناسب‌ترین آرایش میدل حرارتی، نتایج آزمایش‌ها از دیدگاه تأثیر جنس لوله، قطر لوله، آرایش لوله‌گذاری و عمق نصب مورد مقایسه قرار گرفته است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد یک شمع انرژی بتنی درجا با هدف بررسی تأثیر پارامترهای مختلف لوله‌گذاری بر میزان انتقال حرارت به خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، یک شمع انرژی به طول ۱۶ متر و قطر ۸۰ سانتی‌متر در محل یک پروژه ساختمانی در شهرستان فردیس اجرا شد و هفت طرح مختلف لوله‌گذاری شامل تغییر در جنس، قطر، آرایش و عمق نصب لوله‌ها طراحی و به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفتند. با اندازه‌گیری دمای آب در ورودی و خروجی، دمای خاک در اعماق مختلف و دبی جریان، نرخ انتقال حرارت هر طرح محاسبه و عملکرد حرارتی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که طراحی مناسب لوله‌گذاری، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد حرارتی شمع انرژی دارد. اندازه‌گیری پروفیل دمای خاک نشان داد که از عمق حدود ۷/۵ متر به پایین، نوسانات دمایی خاک به میزان قابل توجهی کاهش یافته و دمای زمین تقریباً به مقدار ثابتی در حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این موضوع بیانگر آن است که بخش عمده ظرفیت حرارتی قابل استفاده زمین در لایه‌های عمیق‌تر قرار دارد و افزایش طول شمع تا رسیدن به این ناحیه، موجب افزایش پایداری

عملکرد سیستم خواهد شد. انتخاب طول ۱۶ متر برای شمع سبب شد بخش قابل توجهی از مبدل حرارتی در ناحیه دارای دمای پایدار قرار گیرد و شرایط مناسبی برای تبادل حرارت فراهم شود.

مقایسه طرح‌های مختلف نشان داد که جنس لوله تأثیر محسوسی بر بازده انتقال حرارت دارد. لوله‌های پنج‌لایه به دلیل ضریب هدایت حرارتی مناسب‌تر و ساختار چندلایه خود، در شرایط یکسان عملکرد بهتری نسبت به لوله‌های پلی‌اتیلن سنگین از خود نشان دادند. همچنین افزایش قطر لوله از ۱۶ به ۲۵ میلی‌متر موجب افزایش محسوس توان انتقال حرارت گردید که این موضوع ناشی از افزایش سطح تبادل حرارت، کاهش افت فشار و بهبود شرایط جریان در داخل لوله‌ها است.

بررسی آرایش لوله‌ها نیز نشان داد که آرایش W نسبت به آرایش U بازده حرارتی بیشتری ایجاد می‌کند. این افزایش عملکرد را می‌توان ناشی از توزیع یکنواخت‌تر مسیر جریان، افزایش سطح تماس مؤثر با بتن و کاهش تداخل حرارتی بین لوله رفت و برگشت دانست. در مقابل، تغییر فاصله بین دو شاخه لوله در آرایش U تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم نداشت و اختلاف مشاهده شده در محدوده خطای آزمایش قرار گرفت.

از سوی دیگر، نتایج مربوط به عمق نصب لوله‌ها نشان داد که افزایش عمق مبدل از ۸ متر به ۱۶ متر باعث افزایش ظرفیت انتقال حرارت می‌شود. دلیل اصلی این موضوع قرارگیری بخش بیشتری از مبدل در ناحیه‌ای با دمای پایدار خاک و کاهش تأثیر نوسانات حرارتی سطح زمین است. بنابراین، افزایش عمق نصب لوله‌ها، در صورت امکان اجرایی، می‌تواند یکی از مؤثرترین راهکارهای افزایش بازده شمع انرژی باشد.

مقدار توان حرارتی مفید اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های مختلف، بسته به نوع لوله‌گذاری، دبی جریان و شرایط عملکرد، در محدوده‌ای حدود ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ وات قرار گرفت. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه یک شمع منفرد قادر به تأمین کامل بار حرارتی یک ساختمان نیست، اما استفاده از مجموعه‌ای از شمع‌های انرژی در فونداسیون ساختمان می‌تواند سهم قابل توجهی در تأمین انرژی مورد نیاز سامانه‌های تهویه مطبوع داشته باشد و وابستگی به سامانه‌های متداول مبتنی بر سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی شمع انرژی به شدت تحت تأثیر نحوه طراحی مبدل حرارتی قرار دارد و انتخاب صحیح جنس، قطر، آرایش و عمق نصب لوله‌ها می‌تواند ظرفیت تبادل حرارت را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، استفاده از لوله پنج‌لایه با قطر بیشتر، آرایش W و بیشترین عمق نصب بهترین عملکرد حرارتی را ارائه داد. با این حال، با توجه به هزینه بالاتر لوله‌های پنج‌لایه، استفاده از لوله پلی‌اتیلن سنگین با قطر بزرگ‌تر می‌تواند به عنوان گزینه‌ای اقتصادی با عملکرد قابل قبول برای بسیاری از پروژه‌های اجرایی پیشنهاد شود. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری شمع انرژی علاوه بر ایفای نقش سازه‌ای در فونداسیون ساختمان، قابلیت بهره‌برداری به عنوان یک مبدل حرارتی کارآمد را نیز دارد و می‌تواند در توسعه ساختمان‌های کم‌مصرف، کاهش مصرف انرژی و حرکت به سوی توسعه پایدار نقش مؤثری ایفا کند. این نتایج می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی، بهینه‌سازی و توسعه کاربرد شمع‌های انرژی در پروژه‌های عمرانی آینده باشد.

## منابع

1. Ambrose, J. (2020, April 12). Carbon emissions from fossil fuels could fall by 2.5bn tonnes in 2020. The Guardian.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Global warming of 1.5°C: An IPCC special report.
3. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Renewable power generation costs in 2020. IRENA.
4. United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). Energy efficiency: The first fuel for the EU economy - How to drive new finance for energy efficiency investments. UNEP.
5. Rafiei, H., & Sadeghi, H. (2019). Energy consumption and economic growth in Iran: An application of a new threshold co-integration approach. Energy, 182, 715-728.

6. Bagheri, M., & Soori, S. (2019). Energy consumption and efficiency improvement strategies in residential buildings of Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 153-169.