The University of Tehran Press

Journal of Sustainable Energy Systems

Online ISSN: 2980-8693

Home Page: https://ses.ut.ac.ir

Thermoeconomic and Exergy Evaluation of Shallow and Deep Geothermal Systems for Greenhouse Heating in Cold Climates (Case Study: Meshginshahr)

Nadereh Tabrizi[1*] | Mojtaba Moravej[2]

1. Corresponding Author, Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran. Email: n.tabrizi@areeo.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran. Email: moravej60@pnu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received: 24 April 2026
Revised: 23 June 2026
Accepted: 24 August 2026
Published Online: 01 January 2027

Keywords:
Ground Source Heat Pump (GSHP),
Exergy,
Greenhouse Heating,
Shallow Geothermal System,
Deep Geothermal Energy.

ABSTRACT

This study presents an energy and exergy analysis of two geothermal systems, including shallow Ground Source Heat Pump (SGHP) and Deep Geothermal Energy (DGE) system, for supplying the heat demand of a greenhouse located in the cold region of Meshginshahr, Iran. The thermodynamic modeling was carried out using Engineering Equation Solver (EES) based on real data from the Sabalan geothermal field. Under design conditions (outdoor temperature of −10 °C and indoor temperature of 20 °C, the greenhouse heating load was calculated to be 126 kW. The results indicate that the SGHP system, utilizing soil at an average temperature of approximately 10 °C, achieves a coefficient of performance (COP) of about 3.5 and an exergy efficiency of 0.62. In contrast, the DGE system, with a geothermal fluid inlet temperature of 85 °C, demonstrates superior thermodynamic performance, reaching an equivalent COP of around 20 and an exergy efficiency of 0.68. This performance improvement is primarily attributed to the higher source temperature and the significantly lower electrical energy requirement in the deep geothermal system. From an economic perspective, although the shallow geothermal system benefits from simpler implementation and lower infrastructure requirements, leading to a shorter payback period, the deep geothermal system offers more stable long-term performance due to its minimal electricity consumption and reduced operational costs. Furthermore, the findings highlight that source temperature and thermal properties of the surrounding environment play a critical role in determining the overall system performance.

Cite this article: Tabrizi, N. & Moravej, M. (2027). Thermoeconomic and Exergy Evaluation of Shallow and Deep Geothermal Systems for Greenhouse Heating in Cold Climates (Case Study: Meshginshahr). *Journal of Sustainable Energy Systems*, 6 (1), 189-202. DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.413773.1236

© Authors retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.413773.1236

Introduction

The high thermal demand of greenhouses, particularly in cold climates, makes heating one of the major energy-consuming operations in protected agriculture. Conventional dependence on fossil fuels for greenhouse heating increases operating costs and contributes to environmental impacts. Geothermal energy provides a continuous thermal resource that can be used through different configurations depending on the temperature and accessibility of the resource. Shallow geothermal systems generally use ground-source heat pumps to extract low-temperature heat from near-surface soil, whereas deep geothermal systems can utilize high-temperature geothermal fluids directly through heat exchangers. The objective of this study was to compare the thermodynamic, exergy, and economic performance of shallow and deep geothermal systems for supplying the heating demand of a

greenhouse under the cold climatic conditions of Meshginshahr, northwestern Iran. The analysis was based on geothermal characteristics associated with the Sabalan geothermal field.

Materials and Methods

A 1000 m² greenhouse was considered as the reference case. The design outdoor and indoor temperatures were −10 °C and 20 °C, respectively. Under these conditions, the calculated greenhouse heating load was 126 kW. Two geothermal configurations were modeled using Engineering Equation Solver (EES). The shallow geothermal system consisted of a horizontal closed-loop ground heat exchanger installed at shallow depth and a vapor-compression ground-source heat pump using R410A refrigerant. The soil temperature was considered approximately 10 °C, with a soil thermal conductivity of 1.65 W/m·K. The deep geothermal configuration employed geothermal fluid from the Sabalan resource and transferred its thermal energy to the greenhouse heating circuit through a plate heat exchanger. An inlet geothermal-fluid temperature of 85 °C was used for the comparative analysis. The main performance indicators were coefficient of performance (COP), exergy efficiency, total annualized cost (TAC), and payback period (PBP). An economic lifetime of 20 years and an annual interest rate of 10% were considered. The exergy analysis was conducted using a reference ambient temperature of 288 K.

Results

The results showed a clear difference between the two geothermal configurations in terms of energy performance. The shallow geothermal heat pump achieved a COP of approximately 3.5 while supplying the 126 kW greenhouse heating load. Its exergy efficiency was approximately 0.62. The relatively moderate COP reflects the electrical work required by the vapor-compression cycle to upgrade the low-temperature heat available from the ground to the temperature level required for greenhouse heating.

In contrast, the deep geothermal system exhibited substantially higher thermodynamic performance. At a geothermal-fluid inlet temperature of 85 °C, the equivalent COP reached approximately 20, while the exergy efficiency increased to about 0.68. The markedly higher COP was primarily associated with the much lower electrical energy requirement of the direct geothermal heating configuration and the higher temperature level of the geothermal source. The analysis of source temperature indicated that increasing geothermal-fluid temperature improved exergy efficiency over the investigated range. However, the rate of improvement decreased at higher temperatures. The results indicated that increasing the source temperature beyond approximately 100 °C produced comparatively limited additional improvement because of the fixed temperature requirement of the greenhouse and increased irreversibilities associated with heat transfer.

The shallow-system sensitivity analysis also showed that increasing the burial depth of the ground heat exchanger improved COP, although the magnitude of improvement decreased progressively with depth. This indicates that deeper installation can provide more stable ground temperatures and improve heat-pump operating conditions, but the thermal benefit should be evaluated against the additional installation cost. The economic analysis showed that the shallow system had a shorter payback period because of its lower initial infrastructure requirements. Nevertheless, the economic attractiveness of the deep system improved as the required heating capacity increased, owing to its low electricity consumption and lower operating cost.

Discussion and Conclusion

The comparison demonstrates that the two geothermal configurations provide different technical and economic advantages. The shallow geothermal heat pump is more appropriate where drilling or access to a high-temperature geothermal resource is limited and where lower initial investment and shorter payback are priorities. Its performance, however, depends strongly on ground thermal conditions and the electrical energy required to operate the heat pump.The deep geothermal configuration provides substantially higher energy performance for the studied conditions because the 85 °C geothermal source can supply the greenhouse heating requirement with very limited electrical input. Its exergy efficiency of approximately 0.68 was also higher than that of the shallow system. Although the deep system requires greater infrastructure and geothermal-resource development, its low operating energy

requirement makes it a potentially attractive option for larger-scale or long-term greenhouse heating applications. The results further demonstrate that geothermal source temperature and the thermal properties of the surrounding ground are decisive parameters in determining system performance. For the Meshginshahr case, the findings support the technical potential of geothermal resources associated with the Sabalan field for greenhouse heating and indicate that the selection between shallow and deep configurations should be based on a combined thermodynamic and economic assessment rather than on energy efficiency alone.

انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

ارزیابی ترمواکونومیک و اگزرژی سیستم‌های زمین‌گرمایی سطحی و عمقی در تأمین بار حرارتی گلخانه در اقلیم سرد (مطالعهٔ موردی: مشکین‌شهر)

نادره تبریزی[۱*] | مجتبی مروج[۲]

۱. نویسندهٔ مسئول، بخش فنی مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: n.tabrizi@areeo.ac.ir

۲. دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. رایانامه: moravej60@pnu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۱۱

کلیدواژه:
پمپ حرارتی زمین‌گرمایی،
اگزرژی،
گلخانه،
زمین‌گرمایی سطحی،
زمین‌گرمایی عمقی.

چکیده

در این مطالعه، تحلیل انرژی و اگزرژی دو سامانهٔ زمین‌گرمایی شامل پمپ حرارتی زمین‌گرمایی سطح (SGHP)و سیستم زمین‌گرمایی عمقی (DGE) برای تأمین بار حرارتی یک گلخانه در منطقهٔ سرد مشکین‌شهر انجام شده است. مدل‌سازی ترمودینامیکی با استفاده از نرم‌افزار EES و بر اساس داده‌های واقعی میدان زمین‌گرمایی سبلان صورت گرفته است. در شرایط طراحی (دمای بیرون ۱۰- و دمای داخل ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد)، بار حرارتی گلخانه برابر ۱۲۶ کیلووات محاسبه شد .نتایج نشان داد سیستم SGHP با خاک دمای حدود ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد، دارای ضریب عملکرد حدود ۳/۵ و بازده اگزرژی ۰/۶۲ است .در مقابل، سیستم DGE با دمای سیال ورودی ۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد، عملکرد بهتری از نظر ترمودینامیکی داشته و به COP معادل حدود ۲۰ و بازده اگزرژی ۰/۶۸ دست یافته است. این اختلاف عملکرد عمدتاً ناشی از دمای بالاتر منبع حرارتی و کاهش نیاز به توان الکتریکی در سیستم عمقی است .از نظر اقتصادی، اگرچه سیستم زمین‌گرمایی سطحی به دلیل سادگی اجرا و نیاز کمتر به زیرساخت، بازگشت سرمایه سریع‌تری دارد، اما سیستم عمقی به دلیل مصرف بسیار پایین انرژی الکتریکی، در بلندمدت عملکرد پایدارتر و هزینه‌های عملیاتی کمتری را نشان می‌دهد .همچنین، نتایج نشان می‌دهد شرایط دمایی منبع و خواص حرارتی محیط نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی سیستم دارند.

استناد: تبریزی، نادره و مروج، مجتبی (۱۴۰۵). ارزیابی ترمواکونومیک و اگزرژی سیستم‌های زمین‌گرمایی سطحی و عمقی در تأمین بار حرارتی گلخانه در اقلیم سرد (مطالعهٔ موردی: مشکین‌شهر). *فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار*، ۶ (۱) ۱۸۹-۲۰۲.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.413773.1236

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: http//doi.org/10.22059/ses.2026.413773.1236

۱. مقدمه

تقاضای جهانی برای انرژی حرارتی در بخش کشاورزی طی دو دهۀ اخیر به طور چشمگیری افزایش یافته است .افزایشی که عمدتاً ناشی از ضرورت تولید مستمر محصولات غذایی، در تمام طول سال و نیاز به ایجاد شرایط اقلیمی کنترل‌شده در گلخانه‌ها است. در این‌میان، سیستم‌های گرمایشی به عنوان یکی از اجزای پرمصرف انرژی در بهره‌برداری از گلخانه‌ها شناخته می‌شوند و معمولاً بین ۶۰ تا ۸۰ درصد از کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهند [۱ـ۳]. در اغلب کشورهای درحال‌توسعه، از جمله ایران، این نیاز حرارتی عمدتاً از طریق سوخت‌های فسیلی به‌ویژه گاز طبیعی تأمین می‌شود که دلیل آن دسترسی گسترده و قیمت یارانه‌ای این منبع انرژی است. با این‌حال، تداوم این وابستگی پیامدهایی همچون افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش منابع تجدیدناپذیر و تحمیل فشارهای اقتصادی فزاینده بر زیرساخت‌های انرژی را به همراه داشته است [۴–۶]. ادغام فناوری‌های گرمایشی تجدیدپذیر و پایدار در سامانه‌های کشاورزی، دیگر فقط یک انتخاب زیست‌محیطی نیست، بلکه به ضرورتی اقتصادی و راهبردی تبدیل شده است .در میان گزینه‌های موجود، انرژی زمین‌گرمایی به دلیل ویژگی‌هایی نظیر دسترسی پیوسته، پایداری عملکرد و میزان پایین انتشار در چرخۀ عمر، در مقایسه با منابعی مانند انرژی خورشیدی و بادی که ذاتاً ناپایدار هستند، به عنوان یکی از راهکارهای امیدبخش مطرح شده است [۷ و ۸]. این انرژی را می‌توان از دو طریق اصلی بهره‌برداری کرد: نخست، از طریق سیستم‌های زمین‌گرمایی کم‌عمق مبتنی بر پمپ‌های حرارتی (GSHP[1]) که از گرادیان دمایی لایه‌های نزدیک به سطح زمین استفاده می‌کنند .و دوم، از طریق سامانه‌های زمین‌گرمایی عمقی (DGE[2]) که با استخراج مستقیم سیالات داغ از مخازن زیرسطحی با دمای بالا عمل می‌کنند[۹ و ۱۰] . در سطح جهانی، کشورهایی مانند ایسلند، ترکیه، ایتالیا و چین نمونه‌های موفقی از به‌کارگیری انرژی زمین‌گرمایی در گرمایش گلخانه‌ها ارائه داده‌اند .به عنوان نمونه، در ایسلند و ترکیه، بیش از ۵۰ هکتار گلخانه با استفاده از سیستم‌های مستقیم زمین‌گرمایی گرم می‌شوند که این امر به کاهش بیش از ۸۰ درصدی مصرف سالانۀ سوخت منجر شده است [۱۱–۱۳]. همچنین، در پژوهشی در سال ۲۰۲۰ نشان داده‌اند سیستم‌های زمین‌گرمایی سطحی قادر هستند حتی در شرایط دمایی زیر صفر، دمای بهینۀ رشد گیاهان (۱۸ تا ۲۲ درجۀ سلسیوس) را در گلخانه حفظ کنند [۱۴]. این تجربیات بین‌المللی، نه‌تنها امکان‌پذیری فنی، بلکه مزایای زیست‌محیطی قابل توجه این فناوری را نیز تأیید می‌کنند .در ایران، فعالیت‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای انرژی زمین‌گرمایی عمدتاً در مناطق شمال‌غربی کشور و به‌ویژه میدان زمین‌گرمایی سبلان متمرکز بوده است .نتایج حفاری‌های اکتشافی در بخش شمال غرب میدان سبلان نشان داده است که دمای مخزن در برخی چاه‌های اکتشافی به بیش از ۲۲۰–۲۴۰ درجۀ سلسیوس می‌رسد، به طوری که بیشینۀ دمای اندازه‌گیری‌شده برابر ۲۴۰ درجۀ سلسیوس در عمق ۱۳۹۷ متری گزارش شده است [۱۵]. استفاده از این منبع در گرمایش گلخانه‌ها، آن هم در قالب سیستم‌های ترکیبی بهینه‌شده از نظر فنی و اقتصادی، هنوز به طور جدی مورد بررسی قرار نگرفته است.

از منظر فنی اقتصادی، مهم‌ترین چالش در توسعۀ سیستم‌های گرمایش زمین‌گرمایی در ایران، ایجاد توازن میان هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالا به‌ویژه در بخش حفاری و تجهیزات تخصصی و مزایای بلندمدت آن، شامل هزینه‌های بهره‌برداری پایین و پایداری عملکرد است .در حالی که سیستم‌های زمین‌گرمایی کم‌عمق هزینۀ نصب کمتری دارند، کارایی آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، میزان رطوبت و نوسانات فصلی دما قرار می‌گیرد .در مقابل، سیستم‌های عمقی عملکرد حرارتی پایدارتر و قابل اعتمادتری ارائه می‌دهند، اما نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر و فناوری‌های حفاری پیشرفته هستند که در داخل کشور به طور گسترده در دسترس نیست [۱۶].

بر این‌اساس، پژوهش حاضر با هدف انجام یک تحلیل جامع مبتنی بر مدل‌سازی، به بررسی هم‌زمان جنبه‌های فنی، اقتصادی و اگزرژی سیستم‌های گرمایش زمین‌گرمایی سطحی (GSHP) و عمقی (DGE) برای کاربرد در گلخانه‌های واقع در اقلیم سرد مشکین‌شهر می‌پردازد. در این مطالعه، شاخص‌های کلیدی عملکرد شامل ضریب عملکرد (COP[3])، بازده اگزرژی (η_{ex})، هزینۀ

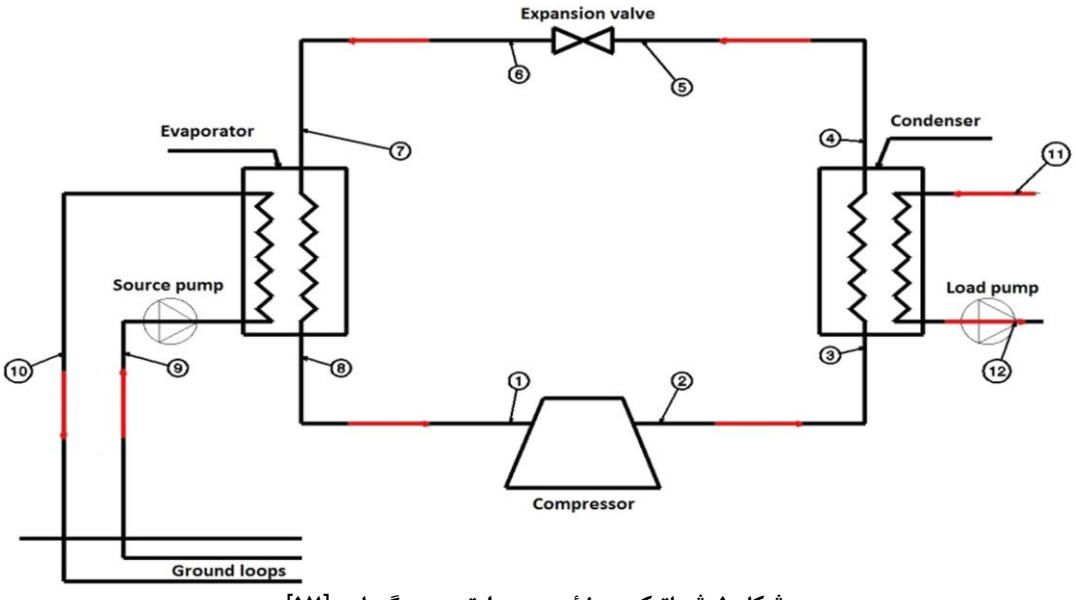
1. Ground Source Heat Pump
2. Deep Geothermal Systems
3. Coefficient of Performance

سالیانهٔ کل (TAC) و دورهٔ بازگشت سرمایه (PBP) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مدل‌سازی سیستم با استفاده از نرم‌افزار (EES[1]) و بر پایه داده‌های واقعی دما و شرایط زمین‌گرمایی میدان سبلان انجام شده است تا امکان شناسایی بهینه‌ترین پیکربندی برای شرایط اقلیمی ایران فراهم شود.

۲. مدل‌سازی و معادلات حاکم

در این پژوهش، دو پیکربندی متمایز از سامانه‌های گرمایش زمین‌گرمایی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند: سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی کم‌عمق (SGHP[2]) و سیستم بهره‌برداری مستقیم از انرژی زمین‌گرمایی عمقی (DGE) هر دو سامانه با هدف تأمین بار حرارتی یک گلخانه به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع، واقع در اقلیم سرد و نیمه‌خشک منطقهٔ مشکین‌شهر در شمال‌غرب ایران (با عرض جغرافیایی ۳۸/۴ درجهٔ شمالی و ارتفاع دهانهٔ چاه‌های اکتشافی میدان زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان بین حدود ۲۲۷۷ تا ۲۶۳۲ متر از سطح دریا طراحی شده‌اند. در این منطقه، میانگین دمای هوای خارج در فصل زمستان حدود ۱۰- درجهٔ سلسیوس است، در حالی که دمای بهینهٔ مورد نیاز برای رشد گیاهان در داخل گلخانه حدود ۲۰ درجهٔ سلسیوس در نظر گرفته شده است. میدان زمین‌گرمایی سبلان، واقع در فاصلهٔ تقریبی ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی منطقهٔ مورد مطالعه، به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی زمین‌گرمایی در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

سیستم SGHP شامل یک مبدل حرارتی زمین (GHE[3]) از نوع حلقهٔ بستهٔ افقی است که در عمق ۲/۵ متری زمین مدفون شده، یک پمپ حرارتی مبتنی بر سیکل تراکمی بخار با مبردR410A ، و یک شبکهٔ توزیع حرارت مبتنی بر سیال[4] در داخل گلخانه است .در مقابل، سیستم DGE بر پایهٔ بهره‌برداری مستقیم از سیال زمین‌گرمایی عمل می‌کند. به گونه‌ای که آب داغ استخراج‌شده از یک چاه تولیدی به عمق ۲۲۶۶ متر و با دمای حدود ۲۲۹ درجهٔ سلسیوس، پس از عبور از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای، انرژی حرارتی خود را به مدار گرمایش گلخانه منتقل می‌کند [۱۵]. در شکل ۱، شماتیک ارائه شده است که در آن مسیرهای انتقال حرارت و حالات اصلی ترمودینامیکی سیال عامل به صورت مفهومی برای چرخهٔ پمپ حرارتی زمین‌گرمایی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱. شماتیک چرخهٔ پمپ حرارتی زمین‌گرمایی [۱۷]

1. Engineering Equation Solver
2. Shallow Geothermal Energy
3. Ground-coupled heat exchanger
4. Hydronic Heating Network

کلیهٔ پارامترهای ترموفیزیکی و اقتصادی مورد استفاده در این مطالعه، از ترکیب داده‌های طراحی مهندسی ارائه‌شده داده‌های آزمون چاه‌های زمین‌گرمایی سبلان[۱۸ و ۱۹] و پایگاه داده خواص ترمودینامیکی نرم‌افزار EES استخراج شده‌اند .به منظور تضمین سازگاری و دقت تحلیل‌ها، مجموعه‌ای از فرضیات مهندسی نیز در مدل لحاظ شده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از داده‌های ورودی و پارامترهای کلیدی مورد استفاده در شبیه‌سازی را ارائه می‌دهد.

محاسبات بار حرارتی گلخانه

معادلهٔ حرارت کلی از روابط انتقال گرما بین داخل و بیرون استخراج می‌شود [۲۰ و ۲۱]:

U ضریب انتقال حرارت پوشش گلخانه ($W/m^2 \cdot K$)

A سطح گلخانه (m^2)

$$Q_{total} = U \times A \times (T_{in} - T_{out}) \times 1.2 \quad (۱)$$

در این پژوهش، دمای خاک با استفاده از مدل استاندارد Kusuda Achenbach محاسبه شد که تغییرات فصلی دمای خاک را در نظر می‌گیرد [۲۲ و ۲۳].

$$T(z,t) = T_m - A_s e^{z\sqrt{\frac{\pi}{360\alpha}}} \cos\left[\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{Z}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right] \quad (۲)$$

که در آن:

$T(z,t)$دمای خاک در عمق (z) و زمان (t)، (T_m) میانگین سالانه دمای سطح زمین، (A_s) دامنهٔ نوسان سالانهٔ دمای سطح زمین، αضریب نفوذ حرارتی خاک (m^2/day) و t روز سال و t_0 روز وقوع حداقل دمای سطح زمین است.

چرخهٔ تبرید زمین‌گرمایی

در مدل سطحی، چرخهٔ تراکمی بخار با مبرد R410a در فشار تبخیر (p_{evap}=750kPa) و فشار چگالش p_{cond}=3.1MPa تعریف شد .با استفاده از خواص ترمودینامیکی موجود در پایگاه دادهٔ REFPROP، آنتالپی و آنتروپی نقاط اصلی استخراج شد [۲۰ و ۲۱]:

- (h_1=243 kJ/kg)و (s_1=0.92 kJ/kgK)
- (h_2=270 kJ/kg)پس از تراکم ایزوانتروپیک

دبی جرمی مبرد ($\dot{m}_r$=0.02 kg/s) تعیین شد تا بار حرارتی مورد نظر تأمین شود .توان کمپرسور از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

$$W_{comp} = \dot{m}_r * (h_2 - h_1) / (\eta_{comp} * \eta_{motor}) \quad (۳)$$

گرمای خروجی از کندانسور:

$$Q_{cond} = \dot{m}_r * (h_3 - h_2) \quad (۴)$$

و در نتیجه ضریب عملکرد حرارتی:

$$COP_{heating} = Q_{cond} / W_{comp} = 3.5 \quad (۵)$$

تحلیل اگزرژی با دمای مرجع محیطی (T_0= 288K) انجام گرفت. اگزرژی ورودی از کمپرسور و خروجی از کندانسور با روابط ۶ و ۷ محاسبه شد:

$$Ex_{in} = \dot{m}_r * ((h_2 - h_1) - T_0 * (s_2 - s_1)) \quad (۶)$$

$$Ex_{out} = Q_{cond} * (1 - T_0 / T_{cond}) \quad (۷)$$

بازده اگزرژی:

$$\eta_{ex} = Ex_{out} / Ex_{in} \quad (۸)$$

$$Ex_{loss} = Ex_{in} - Ex_{out} \quad (۹)$$

تحلیل اقتصادی برای تبدیل هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه به هزینهٔ سالانه معادل، از ضریب بازیافت سرمایه (CRF[1]) استفاده شد .این ضریب اثر نرخ تنزیل و طول عمر پروژه را به طور هم‌زمان در محاسبات اقتصادی لحاظ می‌کند.

$$CRF = \left(i*(1+i)^{n}\right) / \left((1+i)^{n}-1\right) \quad (۱۰)$$

که در آن: CRF ضریب بازیافت سرمایه($year^{-1}$)، i نرخ تنزیل یا نرخ بهره سالانه و n عمر اقتصادی پروژه (سال) است.

هزینهٔ بهره‌برداری سالانه با فرض تعرفه برق صنعتی ۰/۰۷ دلار بر کیلووات‌ساعت:

$$C_{oper} = C_{electric} * \left(W_{comp} / 1000\right) * t_{oper} \quad (۱۱)$$

بنابراین هزینهٔ سالانه معادل:

$$TAC = \left(C_{install} * CRF\right) + C_{oper} \quad (۱۲)$$

و دورهٔ بازگشت سرمایه:

$$PBP = C_{install} / C_{oper} \quad (۱۳)$$

اجرای مدل زمین‌گرمایی سطحی

مدل سطحی (جدول ۱) بر اساس یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با حلقهٔ افقی طراحی شده است. عمق لوله‌های افقی بین ۲ تا ۳ متر در خاک مرطوب منطقهٔ مشگین‌شهر قرار دارد .داده‌های خاک از میانگین هدایت حرارتی خاک را (k_{soil}=1.65 W/mK)، [۲۴] و دمای پایدار سالانه در عمق سه‌متری را حدود ۱۰ درجهٔ سلسیوس گزارش کرده‌اند [۲۵]. دمای ورودی گلخانه در حالت طراحی ۲۰ درجهٔ سلسیوس و دمای محیط بیرونی در زمستان ۱۰− درجهٔ سلسیوس است. این اختلاف ۳۰ درجه، مبنای محاسبهٔ بار گرمایی گلخانه قرار گرفته است. مساحت گلخانه ۱۰۰۰ مترمربع فرض شده است .ضریب انتقال حرارت پوشش (U) برابر ۳/۵ وات بر مترمربع‌کلوین بر اساس مطالعات [۲۶] لحاظ شد.

جدول ۱. داده‌های ورودی پایه در زمین‌گرمایی سطحی

پارامتر	توضیح	واحد	مقدار	نماد
دمای بیرون زمستان	میانگین دمای زمستان مشگین‌شهر	°C	۱۰−	(T_{out})
دمای مطلوب گلخانه	برای رشد بهینهٔ گیاه	°C	۲۰	(T_{in})
سطح گلخانه	گلخانهٔ استاندارد	m^2	۱۰۰۰	(A_g)
ضریب انتقال حرارت پوشش	پلی‌اتیلن دو لایه	$W/m^2·K$	۳/۵	(U)
ضریب افزایش تلفات	نفوذ و کف	—	۱/۲	—
دمای خاک (۳ متر)	میانگین سالانهٔ خاک مشگین‌شهر	°C	10	(T_s)
هدایت حرارتی خاک	خاک مرطوب آبرفتی	W/m·K	۱/۶۵	(k_{soil})
مبرد	چرخهGSHP	—	R410A	—
بازده کمپرسور	راندمان مکانیکی	—	۰/۸	(η_c)
بازده الکتریکی	راندمان موتور	—	۰/۹	(η_e)
نرخ بهرهٔ اقتصادی	برای تحلیل اقتصادی	%	۱۰	(i)
طول عمر پروژه	دورهٔ مالی تحلیل	سال	۲۰	(n)

مدل زمین‌گرمایی عمیق

مدل زمین‌گرمایی عمیق بر پایهٔ استفادهٔ غیرمستقیم از سیال زمین‌گرمایی از طریق مبدل حرارتی طراحی شد. در این آرایش، سیال زمین‌گرمایی مستقیم وارد شبکهٔ گرمایش گلخانه نمی‌شود، بلکه حرارت آن از طریق مبدل به مدار ثانویه منتقل می‌شود . پارامترهای دمایی مدل بر اساس داده‌های منتشرشده از چاه‌های اکتشافی میدان زمین‌گرمایی سبلان) ناحیهٔ مویل (انتخاب شدند . با توجه به اینکه هدف مطالعه، مقایسهٔ عملکرد سامانه‌ها در تأمین بار حرارتی گلخانه است، دمای سیال ورودی به مبدل ۸۵ درجهٔ

1. Capital Recovery Factor

سلسیوس در نظر گرفته شد .همچنین، به منظور بهره‌برداری مؤثرتر از انرژی حرارتی سیال و کاهش نرخ جریان جرمی مورد نیاز، دمای خروجی سیال از مبدل به صورت ثابت فرض نشده و از موازنهٔ انرژی سیستم محاسبه شد [۲۷ و ۲۸]، (جدول ۲).

نرخ جریان جرمی از معادلهٔ ۱۴ تعیین شد:

$$m_{dot} = Q_{geo} / \left(Cp_{water} \times \left(T_{in} - T_{out}\right)\right) \quad (۱۴)$$

انتقال حرارت مؤثر

$$Q_{geo} = \dot{m} c_p \Delta T = 126 \quad (۱۵)$$

$$Q_{geo} = \dot{m} * Cp_{water} * \left(T_{in} - T_{out}\right) \quad (۱۶)$$

ضریب عملکرد معادل

$$COP_{eq} = Q_{geo} / W_{pump} \quad (۱۷)$$

اگزرژی بر اساس اختلاف دمای منبع و محیط:

$$\eta_{ex} = 1 - \left(T_0 / T_{geo}\right) * \left(1 - \left(\Delta T / T_{geo}\right)\right) \quad (۱۸)$$

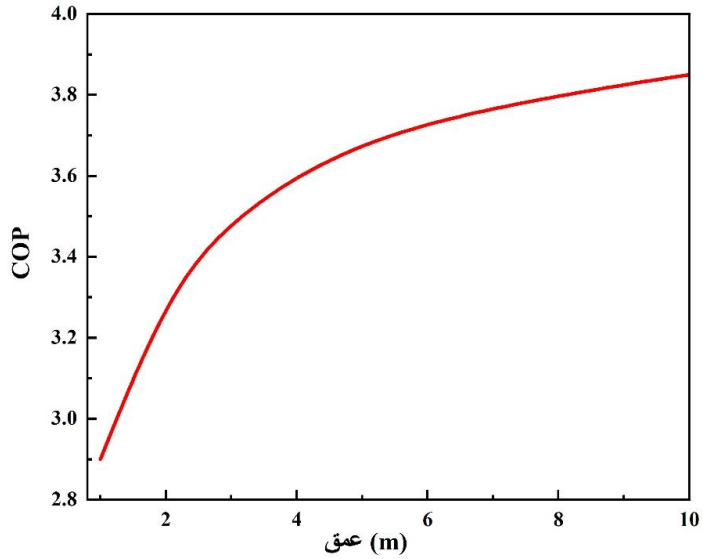
جدول ۲. داده‌های ورودی پایه برای سیستم عمیق

پارامتر	توضیح	واحد	مقدار
ورودی زمین‌گرمایی سیال دمای	مبدل به زمین‌گرمایی سیال ورودی دمای	°C	85، [29]
مبدل از خروجی دمای	انتقال در حرارتی افت	°C	۴۰
(مطلوب) گلخانه دمای	—	°C	۲۰
حرارتی گلخانه بار	سطحی مدل مشابه	kW	۱۲۶
آب ویژه گرمای	—	kJ/kg·K	۴/۱۸
جرمی جریان نرخ		—	$(m = Q / (c_p \Delta T)) = 2kg/s$
مبدل حرارت انتقال بازده	تیتانیومی صفحه‌ای مبدل برای	—	۰/۸۷
تأسیسات و حفاری هزینهٔ	ساتبا برآورد	—	1900 $/kW

۳. بحث و نتایج

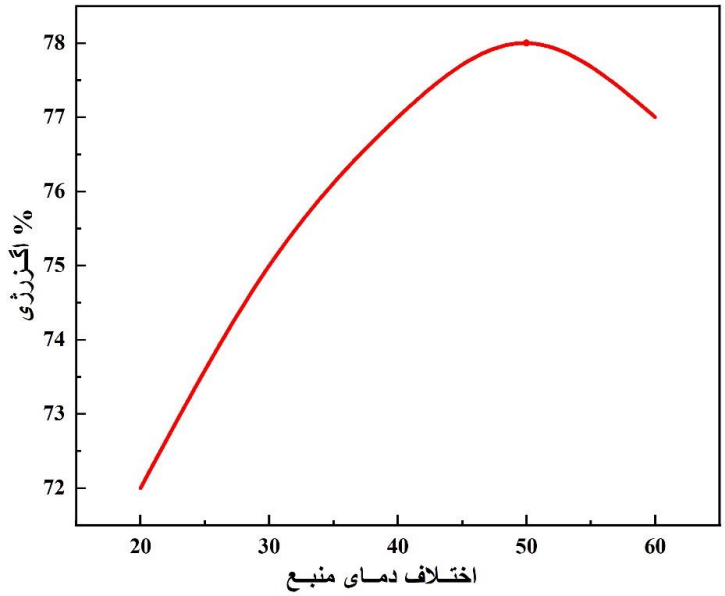
شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش عمق دفن لوله‌های سیستم زمین‌گرمایی سطحی، ضریب عملکرد (COP) به صورت افزایشی اما با شیب کاهنده رشد می‌کند .در عمق‌های کم (حدود ۱ تا ۳ متر)، افزایش COP محسوس است که ناشی از افزایش دمای پایدار خاک و در نتیجه، کاهش اختلاف دمای بین اواپراتور و کندانسور است .این امر باعث می‌شود اختلاف فشار مورد نیاز در فرایند تراکم کاهش یافته و در نتیجه، توان الکتریکی مورد نیاز کمپرسور برای فشرده‌سازی مبرد کمتر شود، که درنهایت، به بهبود راندمان سیستم منجر می‌شود .با این‌حال، از حدود عمق ۴ متر به بالا، نرخ افزایش COP بسیار محدود می‌شود و منحنی به حالت تقریباً اشباع می‌رسد .این رفتار نشان می‌دهد در سیستم‌های زمین‌گرمایی سطحی، پس از یک عمق بهینه (حدود ۳ تا ۴ متر)، افزایش بیشتر عمق تأثیر قابل توجهی بر عملکرد ندارد، در حالی که هزینهٔ حفاری و اجرا افزایش می‌یابد. بنابراین، انتخاب عمق بهینه در بازه کم‌عمق، تعادل مناسبی بین کارایی حرارتی و هزینهٔ اقتصادی ایجاد می‌کند که با فرضیات مدل و داده‌های ارائه‌شده در این پژوهش هم‌خوانی دارد. شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش عمق دفن لوله‌های مبدل حرارتی، ضریب عملکرد (COP) سیستم به طور پیوسته افزایش می‌یابد .این روند ناشی از افزایش دمای متوسط و کاهش دامنهٔ نوسانات حرارتی خاک در اعماق بیشتر است که موجب بهبود شرایط تبادل حرارت در اواپراتور و کاهش کار مورد نیاز کمپرسور می‌شود .همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، نرخ افزایش COP در اعماق بیشتر کاهش می‌یابد، اما روند کلی همچنان صعودی است و در محدودهٔ مورد مطالعه (۱ تا ۱۰ متر) هیچ نقطه حداکثر یا رفتار اشباع مشاهده نمی‌شود .به بیان دیگر، نتایج این پژوهش نیز همسو با مطالعات پیشین نشان

می‌دهد افزایش عمق دفن مبدل حرارتی به بهبود عملکرد سامانه منجر می‌شود، هرچند میزان این بهبود در اعماق بالاتر به‌تدریج کمتر می‌شود.



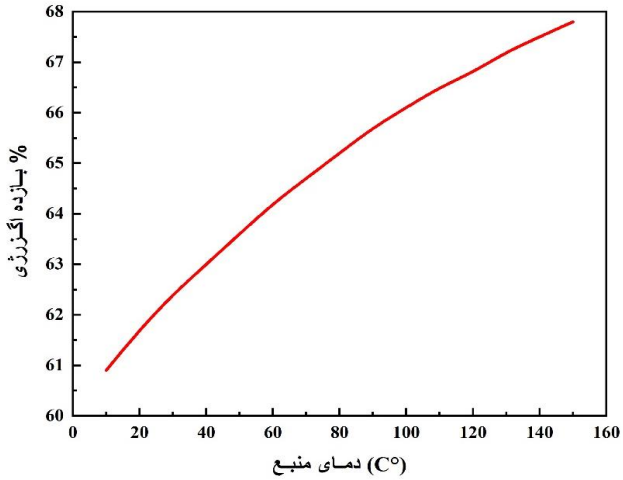
شکل ۲. تغییر COP با عمق زمین در سیستم زمین‌گرمایی سطحی

شکل ۳ تغییرات راندمان اگزرژی سامانهٔ زمین‌گرمایی عمقی را بر حسب اختلاف دمای بین سیال زمین‌گرمایی ورودی به مبدل حرارتی و مدار گرمایش گلخانه ($\Delta T=T_{geo}-T_{load}$) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش دمای سیال زمین‌گرمایی، راندمان اگزرژی ابتدا افزایش می‌یابد؛ زیرا ظرفیت انتقال حرارت مفید و قابلیت انجام کار ترمودینامیکی سیال افزایش پیدا می‌کند. با این‌حال، در اختلاف دماهای بالاتر، نرخ افزایش تخریب اگزرژی در مبدل حرارتی به دلیل افزایش تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت با اختلاف دمای زیاد، از منافع حاصل از افزایش دمای منبع پیشی می‌گیرد. در نتیجهٔ راندمان اگزرژی پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه حدود ΔT ~۵۰ درجهٔ سلسیوس روندی کاهشی پیدا می‌کند. بنابراین نقطهٔ بهینهٔ مشاهده‌شده در شکل، حاصل موازنه میان افزایش کیفیت انرژی ورودی و افزایش برگشت‌ناپذیری‌های داخلی سامانه است.



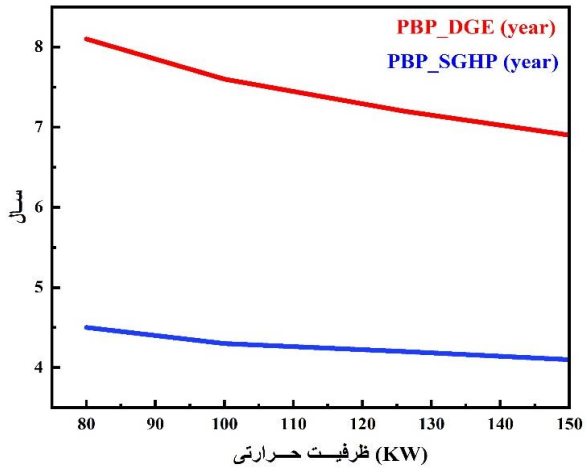
شکل ۳. راندمان اگزرژی با اختلاف دمای بین منبع زمین‌گرمایی و مصرف‌کنندهٔ حرارت (گلخانه)

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش دمای منبع زمین‌گرمایی، بازده اگزرژی سیستم به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد، به طوری که از حدود ۶۱ درصد در دماهای پایین به نزدیک ۶۸ درصد در دماهای بالا می‌رسد. با این‌حال، شیب این افزایش در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس به طور محسوسی کاهش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ رسیدن سیستم به محدودیت‌های ترمودینامیکی ناشی از دمای ثابت مصرف‌کننده) گلخانه (است .این رفتار با مطالعات [۳۲–۳۰]، هم‌خوانی دارد که بیان می‌کنند در سیستم‌های دمای پایین، افزایش دمای منبع پس از یک آستانهٔ مشخص تأثیر محدودی بر بهبود بازده اگزرژی دارد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای منبع زمین‌گرمایی، بازده اگزرژی سیستم به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. این افزایش در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس قابل توجه بوده، اما در دماهای بالاتر روند آن به حالت اشباع نزدیک می‌شود. این رفتار ناشی از محدودیت دمای مصرف‌کننده (گلخانه) و افزایش اتلافات اگزرژی در مبدل‌های حرارتی است. بنابراین، بازه دمایی ۸۰ تا ۱۰۰ درجهٔ سلسیوس به عنوان محدودهٔ بهینه عملکرد سیستم زمین‌گرمایی عمقی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ٤. تغییرات بازده اگزرژی بر حسب دمای منبع زمین‌گرمایی

در شکل ۵ با افزایش انرژی حرارتی مورد نیاز گلخانه، دورهٔ بازگشت سرمایه در هر دو سیستم کاهش پیدا می‌کند، اما این کاهش در سیستم عمقی محسوس‌تر از سیستم سطحی است. در تمام محدودهٔ بررسی، سیستم سطحی همچنان بازگشت سرمایه سریع‌تری دارد، ولی اختلاف آن با سیستم عمقی به‌تدریج کمتر می‌شود. در ظرفیت طراحی حدود ۱۲۶ کیلووات نیز همین روند حفظ شده است. در مجموع، داده‌ها نشان می‌دهند هرچه مقیاس سیستم بزرگ‌تر شود، شرایط اقتصادی به نفع سیستم عمقی بهبود یافته و فاصلهٔ آن با سیستم سطحی کاهش می‌یابد.



شکل ۵. دورهٔ بازگشت سرمایه برای سیستم سطحی و عمیق

۴. نتیجه‌گیری

کاربرد سیستم‌های انرژی زمین‌گرمایی به منظور کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در بخش کشاورزی در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است .در این مطالعه، عملکرد انرژی و اگزرژی دو نوع سیستم زمین‌گرمایی سطحی و عمقی برای تأمین بار حرارتی گلخانه‌ها با استفاده از رویکردهای تحلیل انرژی و اگزرژی بررسی شده است. همچنین، ارزیابی اقتصادی این سیستم‌ها بر اساس شاخص هزینهٔ سالانه معادل (TAC) انجام شده است .نتایج نشان داد سیستم زمین‌گرمایی سطحی با بهره‌گیری از پمپ حرارتی و انرژی حرارتی خاک با دمای حدود ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد، قادر به تأمین بار حرارتی ۱۲۶ کیلووات با ضریب عملکرد حدود ۳/۵ و بازده اگزرژی ۰/۶۲ است. در مقابل، سیستم زمین‌گرمایی عمقی که از سیال داغ با دمای ۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده می‌کند، عملکرد انرژی بسیار بالاتری دارد و ضریب عملکرد آن به حدود ۲۰ می‌رسد، در حالی که بازده اگزرژی آن نیز به ۰/۶۸ افزایش می‌یابد که این امر ناشی از مصرف بسیار کم انرژی الکتریکی در این سیستم است .نتایج همچنین بیانگر آن است که افزایش دمای منبع تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث بهبود بازده اگزرژی می‌شود، اما افزایش بیشتر دما تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت .بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد اگرچه سیستم سطحی از نظر هزینهٔ اولیه و دورهٔ بازگشت سرمایه مناسب‌تر است، اما سیستم عمقی به دلیل هزینهٔ بهره‌برداری پایین و پایداری حرارتی بالا، گزینه‌ای قابل توجه برای استفاده در بلندمدت محسوب می‌شود.

منابع

[1]. Abedrabboh, O., M. Koç, and Y. Biçer, Modelling and analysis of a renewable energy-driven climate-controlled sustainable greenhouse for hot and arid climates. Energy Conversion and Management, 2022. **273**: p. 116412.

[2]. Cimmino, L. and M. Vicidomini, Renewable Energy Systems 2023. Applied Sciences, 2024. **14**: p. 1918.

[3]. Calise, F., et al., Dynamic Modelling and Energy, Economic, and Environmental Analysis of a Greenhouse Supplied by Renewable Sources. Applied Sciences, 2023. **13**: p. 6584.

[4]. Hessari, F.A., Sectoral energy consumption in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005. **9**(2): p. 203-214.

[5]. Jahandideh, M., et al., Leveraging renewable energy for mitigating greenhouse gas emissions in Iran. Energy Conversion and Management: X, 2026. **30**: p. 101632.

[6]. Mollahosseini, A., et al., Renewable energy management and market in Iran: A holistic review on current state and future demands. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **80**: p. 774-788.

[7]. Gülergül, Ö. and A. Baba, Leveraging Geothermal Energy for Sustainable Agricultural Growth: A Pathway to Regional Economic Revitalization through Heated Greenhouse Systems. 2025.

[8]. Wahid, M.N., et al., A strategic analysis of geothermal energy for sustainable energy transition: Case study from Indonesia. Energy Conversion and Management: X, 2025. **28**: p. 101303.

[9]. Ogail, A., et al., A Review of Exploiting Shallow Geothermal Energy through Tunnels: Current Status and Future Prospects. Renewable Energy, 2024. **238**: p. 121958.

[10]. Li, G., et al., Status and challenges of deep geothermal exploitation and energy storage technology: a comprehensive review. GeoEnergy Communications, 2025. **1**(1): p. 5.

[11]. Boyacı, S., et al., Energy Efficiency in Greenhouses and Comparison of Energy Sources Used for Heating. Energies, 2025. **18**(3): p. 724.

[12]. Kassem, M.A. and A. Moscariello, Geothermal energy: A sustainable and cost-effective alternative for clean energy production and climate change mitigation. Sustainable Futures, 2025. **10**: p. 101247.

[13]. Lund, J.W., Geothermal ResourcesgeothermalresourceWorldwide, Direct Heat Utilizationgeothermalresourcedirect heat utilizationof, in Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, R.A. Meyers, Editor. 2012, Springer New York: New York, NY. p. 4353-4379.

[14]. Iorio, M., et al., Low Enthalpy Geothermal Systems in Structural Controlled Areas: A Sustainability Analysis of Geothermal Resource for Heating Plant (The Mondragone Case in Southern Appennines, Italy). Energies, 2020. **13**(5): p. 1237.

[15]. Noorollahi, Y. and R. Itoi, Production capacity estimation by reservoir numerical simulation of northwest (NW) Sabalan geothermal field, Iran. Energy, 2011. **36**(7): p. 4552-4569.

[16]. Noorollahi, Y., et al., Review of two decade geothermal energy development in Iran, benefits, challenges, and future policy. Geothermics, 2019. **77**: p. 257-266.

[17]. Chahartaghi, M., et al., Energy and exergy analyses and thermo-economic optimization of geothermal heat pump for domestic water heating. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2019. **14**(2): p. 108-121.

[18]. Seyedrahimi-Niaraq, M., et al., Development of an updated geothermal reservoir conceptual model for NW Sabalan geothermal field, Iran. Geothermal Energy, 2017. **5**(1): p. 14.

[19]. Ghaedrahmati, R., et al., 3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran. Journal of Applied Geophysics, 2013. **93**: p. 12-24.

[20]. Mehregan, M., et al., Energy and exergy analyses and thermo-economic optimization of geothermal heat pump for domestic water heating. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2019.

[21]. Kakaç, S. and H. Liu, Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Second Edition. 2002. 1-493.

[22]. Mustafa Omer, A., Ground-source heat pumps systems and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(2): p. 344-371.

[23].Kusuda, T. and Achenbach, P. (1965), Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States:, , National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], https://doi.org/10.6028/NBS.RPT.8972 (Accessed June 21, 2026)
[24].Dalla Santa, G., et al., An updated ground thermal properties database for GSHP applications. Geothermics, 2020. **85**: p. 101758.
[25].Options and Applications for Ground Source Heat Pumps, in An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. 2012. p. 150-201.
[26].Peng, Z., S. Carrigan, and O. Kornadt, Investigation of the influence of different room geometries and wall thermal transmittances on the heat transfer in rooms with floor heating. Energy and Buildings, 2024. **317**: p. 114391.
[27].Roumi, S., et al., Direct Applications of Geothermal Energy; Economic and Environmental Assessment: Meshkin-Shahr, Iran. 2017.
[28].Yousefi, H., et al., Cascading uses of geothermal energy for a sustainable energy supply for Meshkinshahr City, Northwest, Iran. Geothermics, 2019. **79**: p. 152-163.
[29].Rezaei, A., M. Rezaeian, and S. Porkhial, The hydrogeochemistry and geothermometry of the thermal waters in the Mouil Graben, Sabalan volcano, NW Iran. Geothermics, 2019. **78**: p. 9-27.
[30].Al-Hamed, K.H.M. and I. Dincer, Investigation of a concentrated solar-geothermal integrated system with a combined ejector-absorption refrigeration cycle for a small community. International Journal of Refrigeration, 2019. **106**: p. 407-426.
[31].Tempesti, D., G. Manfrida, and D. Fiaschi, Thermodynamic analysis of two micro CHP systems operating with geothermal and solar energy. Applied Energy, 2012. **97**: p. 609-617.
[32].Guisado, J.M., A. Carro, and R. Chacartegui, Avoidable exergy performance analysis in the integration of an electrothermal energy system based on transcritical CO2 cycles. Energy Conversion and Management, 2026. **348**: p. 120706.