

تحلیل اقتصادی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در مناطق سردسیر شمالغرب ایران

آیدا کریمی دستجرد^۱، فرشاد ترابی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، i.karimi@srbiau.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ftorabi@kntu.ac.ir

چکیده

سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی یک تکنولوژی با کارایی بالا در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، جهت صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع است. این سیستم اگرچه از انرژی الکتریکی استفاده می‌کند ولی یکی از فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر به حساب می‌آید. از جمله معضلات این سیستم‌ها، هزینه‌های بالای راه‌اندازی آنها به خاطر افزوده‌شدن هزینه‌های حفاری است و بنابراین به منظور جایگزینی سیستم‌های فعلی با یک پمپ زمین‌گرمایی باید محاسبات اقتصادی نیز صورت بگیرد. در این مقاله امکان استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در ایران به جای سیستم‌های مرسوم گرمایشی و همچنین امکان استفاده از مبدل حرارتی افقی اسلینکی بررسی شده است. به منظور طراحی یک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، در این مقاله با بررسی شرایط منطقه‌ای، پارامترهای اصلی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی طراحی شده است. نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن نرخ دلار بازار آزاد، بازگشت سرمایه ۸ سال و با نرخ مرجع، بازگشت سرمایه در حدود ۵ سال محاسبه می‌شود، که نشان‌دهنده نیاز این سیستم‌ها به حمایت‌های دولتی است. با در نظر گرفتن نتایج حاصله، در صورتی که بازار ارز دچار نابسامانی‌های اخیر نمی‌شد و نیز نرخ انرژی در ایران به نرخ‌های واقعی نزدیک بود، این سیستم‌ها از توجیه بالای اقتصادی برخوردار می‌بودند.

واژه‌های کلیدی

پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، تحلیل اقتصادی، گرمایش، مبدل حرارتی زمینی.

مقدمه

پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از زمین به عنوان چشمه حرارتی (در زمستان) و چاه حرارتی (در تابستان) استفاده می‌کند. این طراحی امکان استفاده از دمای متوسط زمین را در افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های کاربردی سیستم سرمایش و گرمایش فراهم می‌کند. حرارت گرفته شده از زمین، به کمک سیالی نظیر آب‌های زیرزمینی، یا محلول آب و ضدیخ توسط پمپ حرارتی به فضای بسته منتقل می‌شود. در تابستان نیز حرارت از هوای داخل گرفته شده و توسط آب‌های زیرزمینی یا محلول آب و ضدیخ به زمین منتقل می‌گردد.

هیلسی و اوگرسال [۱] با استفاده از مدل کامپیوتری، تاثیر پارامترهای مختلف سیستم را روی عملکرد پمپ حرارتی زمین‌گرمایی بررسی کردند و مقایسه‌ای برای ارزیابی اقتصادی ارائه دادند که امکان استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی در سیستم‌های سرمایش و گرمایش و پمپ حرارتی با منبع هوا را ارزیابی می‌کند. هپاسلی [۲] ارزیابی کارایی یک سیستم پمپ حرارتی با منبع زمینی عمودی را با مبرد R-22 برای گرمایش ارائه داده است. اینالی و ایسن [۳] اثرات پارامترهای عمق کارگزاری مبدل زمینی، نرخ جریان محلول آب و ضدیخ و پساب در عملکرد سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی افقی را در حالت گرمایش بررسی کردند. این گروه در عمق‌های ۱ و ۲ متری متوسط ضریب عملکرد ۲/۶۶ و ۲/۸۱ را حاصل کردند. پتیت و مییر [۴] مقایسه اقتصادی بین سیستم پمپ حرارتی با منبع زمینی عمودی و با منبع هوا را انجام دادند. پولات و همکاران [۵] عملکرد سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی حلقه بسته افقی آب به هوا را ارزیابی کردند که شامل تاثیر پارامترهای مختلفی همچون دمای خروجی مبدل زمینی و دمای خارج برای شرایط آب و هوایی زمستانی می‌باشد. فن و همکاران [۶] مطالعات نظری بر عملکرد سیستم ترکیبی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی انجام دادند. اوزگنر [۷] استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی ترکیبی با خورشید و توربین بادی کوچک را برای گرمایش ساختمان‌های مسکونی و کشاورزی مورد بررسی قرار داده است.

در سال‌های اخیر در ایران تحلیل‌های زیادی در زمینه اقتصادی صورت گرفته است. صنایع و همکاران [۸] به بهینه‌سازی ترموگنومیک پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با لوله‌های عمودی پرداختند و اثر برخی پارامترها را روی هزینه کل بررسی کردند. نجات الهی و صیادی [۹] به بررسی اقتصادی استفاده از هوا و زمین به عنوان دو منبع مختلف برای دفع حرارت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در حالت گرمایشی استفاده از پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی از سایر روش‌های تامین حرارت اقتصادی‌تر است. یاری و همکاران [۱۰] با تبدیل پمپ حرارتی با منبع هوا به پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، مدت بازگشت سرمایه ۶ سال را تخمین زدند. صنایع و همکاران [۱۱] به معرفی پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی و هوا پرداخته و مزایا و معایب هر کدام با بررسی اقتصادی مطرح شده‌اند. بدلیل اینکه ۷۰٪ از انرژی مصرفی در ایران صرف گرمایش و سرمایش خانه می‌شود، یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی استفاده از مبدل

حرارتی زمینی می‌باشد. همچنین با استفاده از این سیستم‌ها، از انتشار گازهای گلخانه‌ایی کاسته می‌شود. بطور متوسط پمپ حرارتی زمین گرمایی، حدود ۴۰٪ کمتر از یک پمپ حرارتی هوایی و ۶۵٪ کمتر از گرم کننده‌های الکتریکی انرژی مصرف می‌کند [۱۲]. در مقابل این مزایا، پمپ‌های حرارتی زمینی، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری (در حدود ۵۰٪-۳۰٪) نسبت به پمپ‌های حرارتی هوایی هستند. بخش مهمی از هزینه سرمایه‌گذاری در پمپ‌های حرارتی زمینی به واسطه مبدل حرارتی زمینی می‌باشد. هزینه‌هایی شامل، هزینه لوله پلی اتیلن، هزینه‌های حفر و پر کردن کانال، پمپ سیرکولاتور و سیال ضدیخ (در مناطق سردسیر) به قیمت پمپ حرارتی می‌افزایند [۱۳].

هدف از انجام این مقاله، امکان سنجی استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی در یک منطقه سردسیر از کشور با نیاز گرمایشی بالا می‌باشد. علاوه بر این، مزیت استفاده از سیستم‌های پمپ حرارتی زمین گرمایی با راندمان بالاتر نسبت به سیستم‌های رایج به منظور کاهش مصرف انرژی بررسی خواهیم شد. در نهایت به منظور محاسبه نرخ بازگشت سرمایه و ارزش حال حاضر، ارزیابی اقتصادی سیستم طراحی شده انجام خواهد شد.

محل مورد مطالعه یک مجموعه مرغداری برای سوله‌ای به متراژ ۷۹۵ متر مربع در شهرستان مرند از استان آذربایجان شرقی است که در ناحیه کوهستانی با آب و هوای سرد قرار گرفته است. با توجه به طراحی‌ها و محاسبات صورت گرفته برای این مرغداری به خاطر دمای طرح بالا برای مرغداریها، مصرف انرژی در این واحدها بسیار زیاد است و سالانه هزینه بالای گرمایش با استفاده از گاز طبیعی منجر به تحمیل هزینه‌های زیادی بر این واحدهای اقتصادی شده، لذا طراحی سیستمی با مصرف انرژی کم و راندمان بالا جهت گرمایش این واحدهای تولیدی ضروری به نظر می‌رسد.

تشریح مسئله

سیستم‌های پمپ حرارتی زمین گرمایی

از جمله پارامترهای بسیار مهم در طراحی یک چرخه زمین گرمایی، انتخاب چیدمان بر حسب فضای در دسترس و طول مبدل زمینی است.

در سیستم‌های حلقه بسته (عمودی و افقی)، حرارت از زمین توسط حلقه پیوسته‌ای از لوله‌های پلاستیکی مخصوص که در زیر خاک قرار دارد، انتقال می‌دهد و سیال عامل (آب و ضدیخ) در لوله‌های تحت فشار دوباره به گردش در می‌آید [۱۲]. این گونه سیستم‌ها معمولاً برای تاسیسات مسکونی استفاده می‌شوند و به‌خصوص برای ساختمان‌های جدیدی که زمین کافی موجود باشد از لحاظ هزینه مناسب‌تر است. علاوه بر طرح‌های افقی که در آن لوله‌های زمینی به صورت افقی در زمین نصب می‌شوند و گودال‌هایی به عمق ۱/۲ تا ۱/۸ متر برای چیدمان خطی برای تأمین حرارت مورد نیاز در کویل زمینی در نظر می‌گیرند، از سیستم‌های عمودی نیز برای دفن لوله‌ها می‌توان استفاده کرد. این سیستم‌ها برای

ساختمان‌های تجاری و مدارسی که محدودیت زمین در آن‌ها لحاظ می‌شود [۱۴]، بسیار مناسب بوده و در آن بسته به شرایط خاک و اندازه سیستم چاله‌هایی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر به عمق ۱۸ تا ۶۰ متری حفر می‌گردد. لوله‌های زمینی در این حفره‌ها قرار می‌گیرد و تبادل حرارت با زمین انجام می‌دهد. اگرچه در این سیستم‌ها فضای کمتری برای دفن لوله‌ها استفاده می‌شود، اما در مجموع به علت بالاتر رفتن هزینه حفاری، هزینه راه‌اندازی گران‌تر از سایر سیستم‌ها می‌شود [۱۲].

معمولاً بیشترین طراحی‌ها بر مبنای چرخه حلقه بسته صورت می‌گیرد و هدف این مقاله نیز چنین چرخه‌هایی است. در این چرخه‌ها، لازم است برای تأمین حرارت مورد نیاز در کویل زمینی ۴ تا ۵ متر برای طرح اسلینکی^۱، بسته به نوع طراحی حفر گردد [۱۴]. این بخش از کار یکی از پرهزینه‌ترین مراحل ساخت و راه‌اندازی پمپ‌های زمین گرمایی بوده و باید در طراحی بسیار دقت کرد تا هزینه‌های اولیه‌ی طرح بالا نرود.

در شکل ۱، نمایی از یک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی حلقه بسته نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، این چرخه از سه حلقه‌ی مستقل ترمودینامیکی تشکیل شده که می‌توانند برای تأمین بار حرارتی یا بار برودتی به کار بروند. از آنجا که هدف اصلی تحقیق حاضر تأمین بار حرارتی است، صرفاً به تشریح کارکرد چرخه به منظور تأمین بار حرارتی پرداخته می‌شود. حلقه‌های نمایش داده شده در این شکل عبارتند از:

(الف) در حلقه‌ی I، که در آن حرارت مورد نیاز فضای مورد نظر تأمین می‌گردد. بدین منظور، دمای محلول آب و ضدیخ در کندانسور بالا رفته و از طریق رادیاتورهای نصب‌شده در محل‌های مناسب در فضای مذکور این حرارت را به ساختمان تحویل می‌دهد. به همین دلیل دمای آب کاهش یافته و دوباره برای کسب گرما، توسط پمپ به سمت کندانسور ارسال می‌گردد.

(ب) حلقه‌ی II حلقه‌ی اصلی پمپ حرارتی است و نحوه‌ی کارکرد آن دقیقاً مشابه با یک سیکل پمپ حرارتی متداول است که در آن از مبرد نظیر R-134a به عنوان سیال عامل بکار برده شده، که حرارت را از اواپراتور دریافت کرده و بعد از متراکم شدن در کمپرسور آنرا در کندانسور به سیکل I منتقل می‌کند. دیاگرام این چرخه نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

(ج) حلقه‌ی III حلقه‌ی زمینی را تشکیل می‌دهد که طبق آنچه که در شکل نیز مشخص است، حرارت مورد نیاز جهت تبخیر مبرد حلقه‌ی II را از طریق کویل‌های زمینی تأمین می‌کند. سیال عامل در این سیکل نیز آب به همراه ضد یخ بوده و با استفاده از پمپ به عمق مناسبی از زمین رفته و در آنجا وارد کویل زمینی شده و حرارت دریافت می‌کند.

^۱Slinky

که در آن t_{shift} روزی از سال که سردترین دما رخ می دهد، t_{year} زمان (روز)، T_{mean} متوسط دمای هوا، T_{amp} دامنه دمای سطح و D معرف عمقی است که قرار است در آن دمای خاک به دست بیاید. همچنین α ضریب پخش خاک بوده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

که در آن k ضریب رسانایی خاک، ρ چگالی خاک و C_p ظرفیت گرمای ویژه آن است و برای هر منطقه لازم است با استفاده از اطلاعات جغرافیایی و زمین شناسی آن منطقه، این ضریب ها به دست بیاید.

محاسبه طول کویل حرارتی زمینی

حرارت مورد نیاز گرمایش از طریق کویل حرارتی زمینی وارد پمپ حرارتی می شود. بنابراین برای محاسبه ی طول کویل باید فاکتورهایی نظیر جنس لوله، قطر داخلی و خارجی آن، عمق دفن، دمای عمق دفن و میزان حرارت مورد نیاز جهت گرمایش محاسبه شود. با در دست داشتن این موارد از روابط ترمودینامیکی زیر می توان طول آنرا محاسبه کرد. در حلقه III از شکل ۱ به منظور طراحی مبدل زمینی جهت انتقال حرارت از خاک، بایستی طول مورد نیاز مبدل زمینی محاسبه شود. طول مبدل حرارتی زمینی (L_H) تابعی از مقاومت حرارتی لوله، مقاومت خاک و دمای حداقل آب ورودی و خاک است.

$$L_H = \dot{q}_{g,heat} \left[\frac{R_p + R_s F_h}{T_{g,min} - T_{ewt,min}} \right] \quad (3)$$

که در آن F_h فاکتور بخشی از ظرفیت برای گرمایش [۱۴]، $T_{g,min}$ حداقل دمای زمین و $T_{ewt,min}$ حداقل دمای آب ورودی است. همچنین از معادلات (۴) تا (۶)، R_p مقاومت حرارتی لوله، R_s مقاومت حرارتی خاک و S ضریب شکل بدست می آید که در آن D_i و D_o قطرهای خارجی و داخلی لوله، k_{pipe} رسانایی لوله، k_{soil} رسانایی خاک و d عمق کارگزاری لوله های زمینی است:

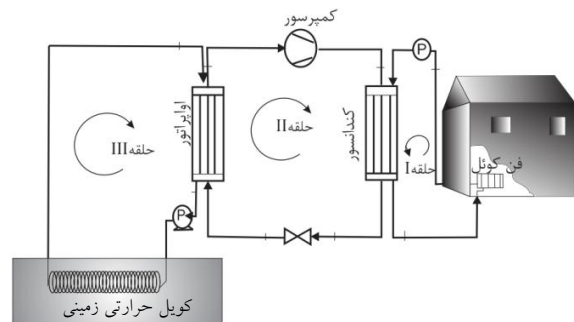
$$R_p = \frac{\ln \left[\frac{D_o}{D_i} \right]}{2\pi k_{pipe}} \quad (4)$$

$$R_s = \frac{1}{S k_{soil}} \quad (5)$$

$$S = \frac{2\pi}{\ln \left[\left(\frac{2d}{D_o} \right) + \sqrt{\left(\frac{2d}{D_o} \right)^2 - 1} \right]} \quad (6)$$

سپس مقدار $q_{g,heat}$ حرارت گرفته شده از زمین از معادله (۷) به دست می آید:

$$\dot{q}_{g,heat} = \dot{Q}_H \left(\frac{COP_h - 1}{COP_h} \right) \quad (7)$$



شکل ۱: نمایی از پمپ حرارتی زمین گرمایی (حلقه بسته)

جهت انتخاب صحیح سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی، پارامترهای مختلفی همچون مشخصات زمین شناسی و نفوذپذیری کافی برای طراحی عمق بهینه کارگزاری مبدل حرارتی زمینی در این سیستم ها الزامی است. امکان بهره برداری از سطح در دسترس، بنا به نیاز سیستم حلقه بسته افقی و مشخصات گرمایشی و سرمایشی ساختمان از مهمترین مواردی هستند که بایستی مد نظر قرار گیرند.

تعیین عمق بهینه مبدل حرارتی زمینی

شرایط آب و هوایی منطقه، تعیین جنس خاک و میزان دمای خاک در عمق های مختلف تأثیر بسیار زیادی در طراحی یک پمپ حرارتی زمین گرمایی دارد. از آنجا که حرارت مورد نیاز برای فرآیند گرمایشی از اعماق خاک به دست می آید، لازم است شرایط ترمودینامیکی عمق خاک و دمای آن در طول سال به دقت محاسبه گردد. این مسأله یکی از مباحث کلیدی در طراحی یک پمپ زمین گرمایی به حساب می آید. دمای خاک در عمق های مختلف در طول سال در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که واضح است، دمای سطح خاک یا عمق صفر برابر با دمای میانگین هوا است زیرا به طور مستقیم با هوا در ارتباط است. بنابراین در طول سال نوسانات بسیار شدیدی دارد. به عنوان مثال دمای سطح خاک در تابستان تا حدود ۴۰ درجه سلسیوس بالا رفته و در زمستان تا ۱۵- درجه سلسیوس کاهش می یابد. اما هرچه در عمق خاک بیشتر نفوذ کنیم، از نوسانات کاسته می شود تا اینکه در یک عمق بخصوص تقریباً نوسانات دمایی از بین می رود.

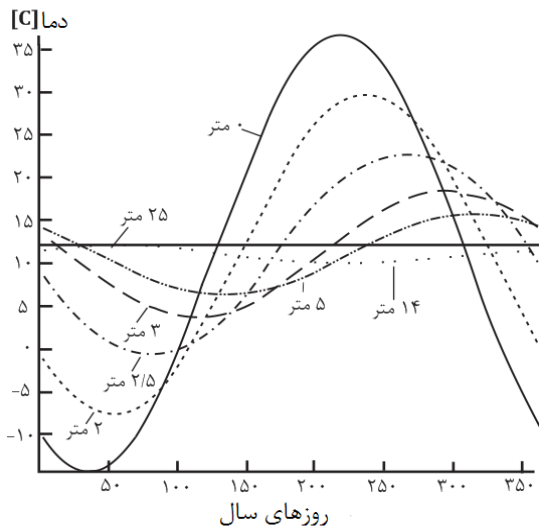
در یک منطقه ی خاص نوسانات دمایی از چه عمقی به بعد از بین می رود یا در چه دمایی ثابت می ماند به عوامل بسیار زیادی نظیر جنس خاک، وجود چشمه های آب زیرزمینی، دمای هوای منطقه، میزان بارندگی در منطقه و غیره دارد و محاسبه ی آن بسیار پیچیده است. اما برای محاسبه ی توزیع دمای عمودی زمین نسبت به عمق رابطه ای بر مبنای آزمایش های تجربی توسط کاسودا [۷] به صورت زیر بیان شده است:

$$T_{soil}(D, t_{year}) = T_{mean} - T_{amp} \times \exp \left(-D \sqrt{\frac{\pi}{365 \times \alpha}} \right) \times \cos(\varphi)$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{365} \left(t_{year} - t_{shift} - \frac{D}{2} \sqrt{\frac{365}{\alpha \pi}} \right)$$

(۱)

و بیشترین دمای هوا به ترتیب 12°C و 39°C گزارش شده است.



شکل ۲: پروفیل عمق - دمای زمین برای منطقه مورد بررسی (مزند)

طبق میانگین گرفته شده از داده‌های سایت سازمان هواشناسی در طول ۱۱ سال گذشته در شهرستان مزند، دمای بیشینه $36/8^{\circ}\text{C}$ و دمای کمینه $15/5^{\circ}\text{C}$ بدست می‌آید. به صورت کلی می‌توان گفت که افزایش عمق مبدل حرارتی زمینی باعث افزایش بازدهی حرارتی آن و در نتیجه صرفه‌جویی بیشتر در مصرف انرژی می‌گردد، ولی همزمان منجر به افزایش هزینه اجرایی سیستم نیز می‌گردد. این رابطه در طراحی‌ها و با توجه به دو فاکتور اساسی هزینه و عمق بهینه کاربرد دارد، با بررسی‌های انجام شده در منطقه مورد نظر با توجه به استانداردهای چیدمان اسلینکی و پروفیل عمق - دما محل و عمق یخبندان $2/5$ متر در منطقه مورد بررسی، عمق بهینه $4/5$ متر محاسبه شده است [۱۸].

با انتخاب پمپ حرارتی که بتواند بار گرمایی 110 کیلووات مورد نیاز را تامین کند، بر پایه محاسبات انجام شده، کمپرسوری با توان $23/7$ کیلو وات لازم است. با استفاده از روابط ترمودینامیکی (۸) و (۹) ضریب عملکرد حرارتی سیستم (COP) مقدار $4/76$ محاسبه شده است. از روابط (۹) نیز مقدار $q_{g,heat} = 71/9 \text{ kW}$ را می‌توان محاسبه کرد. با محاسبه رسانایی خاک $1/9$ وات بر متر کلون و انتخاب لوله یک و یک دوم اینچ در عمق $4/5$ متری با استفاده از روابط (۴) تا (۶) مقدار $R_s = 0/44$, $R_p = 0/08$ وات بر متر کلون، $k_{pipe} = 0/4$, $S = 1/17$ متر کلون بر وات، بر اساس ضریب رسانایی خاک منطقه و محاسبه طول لوله مورد نیاز برای یک سوله 1500 متر به دست می‌آید. به دلیل بالا بودن هزینه حفاری سیستم‌های عمودی و با تعیین عمق یخبندان $2/5$ متر، سیستم حلقه بسته اسلینکیدر عمق $4/5$ متر برای مبدل حرارتی زمینی انتخاب گردید.

نهایتاً با جایگذاری مقادیر بدست آمده از معادلات (۴) تا (۷) در معادله (۳) طول مبدل حرارتی زمینی به دست می‌آید [۵]. قانون اول ترمودینامیک و ضریب عملکرد برای یک پمپ حرارتی به طور کلی می‌توان نوشت:

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C \quad (8)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} \quad (9)$$

نتایج

در کار حاضر بار حرارتی مورد نیاز برای یک سوله با استفاده از نرم افزار کریر ۴.۵ و بر پایه اطلاعات هواشناسی منطقه، تعیین مصالح تشکیل دهنده سوله و مقاومت حرارتی هر یک از اجزا بار مورد نیاز سوله 110 کیلووات محاسبه شد. به این دلیل که در مرغاریها مقدار بار حرارتی بیشتر مورد نیاز است، بنابراین مبنای طراحی بر اساس بار حرارتی انجام شده است. با رجوع به داده‌های هواشناسی که از منطقه به دست آمده، مشخص شد که دمای میانگین با توجه به دمای کمینه و بیشینه در شهر مزند برابر با $11/24^{\circ}\text{C}$ است.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی خاک [۱۶]

نوع	k	ρC_p
خاک رس و گل	۱/۵	3×10^6
شن و ماسه	۲	2×10^6
سنگ همگن	۳/۵	2×10^6

همچنین خصوصیات فیزیکی خاک و پروفیل خاک منطقه از سازمان جغرافیایی منطقه مطابق با جدول ۱ به دست آمده است. با در دست داشتن ترکیب خاک منطقه از شرکت آب منطقه‌ای تبریز که ترکیبی از شن، ماسه، رس و تخته سنگ است و با استفاده از جدول ۱ و معادله (۲) مقدار $\alpha = 0/086$ متر مربع در روز محاسبه می‌شود. شکل ۲ منحنی حاصل از نتایج بدست آمده از روابط (۱) و (۲)، را به عنوان پروفیل دما - عمق برای این منطقه نشان می‌دهد. مطابق شکل زمین در عمق 25 متری زمین، هم در تابستان و هم در زمستان، تفاوت دمایی مناسب تری با دمای هوا دارد و دمای زمین به مقدار تقریباً ثابت $11/24$ درجه سلسیوس رسیده است. پس تغییرات فصلی، تاثیر اندکی در عملکرد سیستم خواهد گذاشت. با این وجود استفاده از چنین عمقی باعث افزایش چشمگیر هزینه‌های خاک برداری خواهد شد. عمق یخبندان این منطقه در حدود $2/5$ متری از سطح زمین تخمین زده می‌شود. این نتایج در تعیین عمق کارگزاری لوله‌های مبدل زمینی در صورتیکه محدودیت فضا نداشته باشیم (سیستم بسته افقی)، مورد توجه قرار گرفته است.

عمق مناسب برای مبدل حرارتی زمینی در هر ناحیه به عوامل متعددی از جمله ضریب پخش خاک (α)، متوسط دمای هوا (T_{mean})، عمق کارگذاری زیر زمین (D)، دامنه دمای سطح (T_{amp}) در طول سال بستگی دارد. طبق گزارشات گرفته شده از سایت سازمان هواشناسی در طول سال 1390 در شهرستان مزند، کمترین

تحلیل اقتصادی

دو فاکتور اساسی در رابطه با تعیین میزان اقتصادی بودن یک سرمایه‌گذاری، دوره بازگشت سرمایه و نرخ سود (IRR) حاصل از آن سرمایه‌گذاری می‌باشد. با استفاده از روش محاسبه زمان بازگشت سرمایه منصفانه (EPBT) و حذف عامل زمان در محاسبات، ارزش جریان نقدینگی را که در سالهای آتی کسب خواهد شد را با استفاده از ضریب تنزیل (AF) به ارزش روز (PV) تبدیل می‌گردد که از روابط (۱۰) و (۱۱) قابل محاسبه است [۱۹]:

$$AF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (10)$$

$$PV = \frac{1}{(1+i)^n} FV \quad (11)$$

که در آن n سال پروژه و FV ارزش آتی در آن سال می‌باشد. ارزش روز خالص (NPV) برابر مجموع ارزش‌های روز و با نرخ تنزیل به صورت رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$NPV(i) = \sum_{t=0}^n PV(t) \quad (12)$$

شاخص IRR نرخ تنزیلی است که به ازای آن شاخص NPV طرح معادل صفر گردد. یک سرمایه‌گذاری زمانی اقتصادی است که دوره بازگشت سرمایه کوتاهتر از عمر مفید سیستم بوده و نرخ سود حاصل از آن سرمایه‌گذاری بیشتر از نرخ سود بانکی باشد. با استفاده از رابطه (۱۳) مدت زمان بازگشت سرمایه منصفانه محاسبه خواهد شد:

$$EPBT = \frac{1}{IRR} \quad (13)$$

جهت انجام تحلیل اقتصادی، محاسبه میزان صرفه‌جویی در انرژی برای سیستم مورد طراحی (پمپ حرارتی زمین‌گرمایی) نسبت به سیستم موجود (سیستم گرمایشی با سوخت گاز طبیعی) میزان تعرفه‌های برق و گاز از پایگاه داده‌های سایت رسمی وزارت نیرو استخراج شده‌اند. قیمت گاز برای بخش کشاورزی در سال ۹۰ به میزان ۱۰۰۰ ریال بر متر مکعب و قیمت برق طبق جدول ۲ در تعرفه ب-۳ تعیین گردیده است.

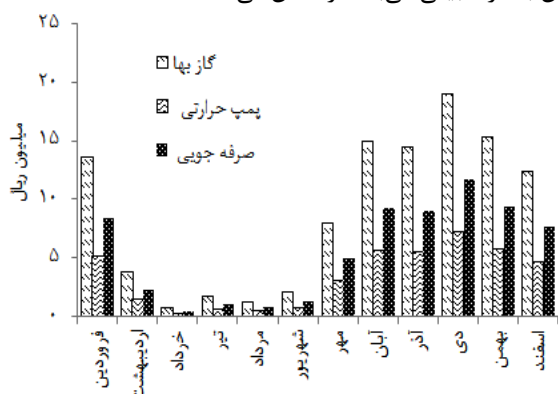
جدول ۲: بهای برق برای بخش کشاورزی در سال ۹۰ [۱۷]

کد تعرفه	بهای قدرت		بهای انرژی (kWh/ریال)	
	(kW/ریال)	میان‌باری	اوج بار	کم‌باری
الف-۳	-	۸۰	۱۶۰	۴۰
ب-۳	۱۲۰۰۰	۱۵۵	۳۱۰	۷۷/۵

میزان برق مصرفی در این سالن پرورش مرغهای گوشتی، سالانه ۶ میلیون و ۴۰۷ هزار ریال (۲۸۴۷۲ کیلو وات ساعت) و میزان گاز مصرفی ۱۰۸ میلیون ریال (۱۰۷۶۹۶ مترمکعب) در سال بوده است که بر اساس هزینه پرداخت شده قبوض، متوسط قیمت گاز ۱۴۴/۵ ریال بر کیلو وات ساعت و متوسط قیمت برق ۲۲۵ ریال بر کیلو وات ساعت تخمین زده می‌شود (با در نظر گرفتن ارزش حرارتی ۸۵۰۰ کیلو کالری به ازای هر متر مکعب گاز طبیعی و بازده مشعل ۰/۷، هر

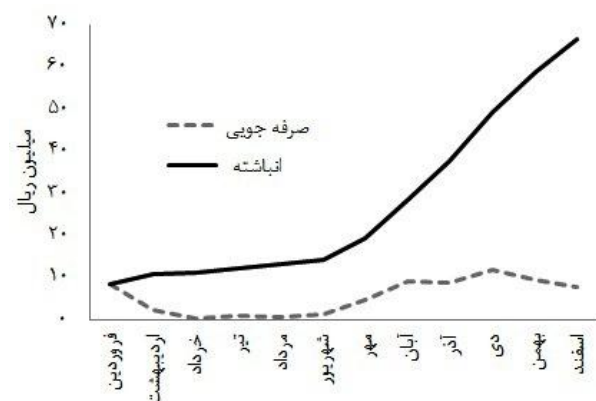
مترمکعب گاز طبیعی معادل ۶/۹ کیلووات ساعت محاسبه می‌گردد). برای محاسبه میزان صرفه‌جویی ریالی سالانه در صورت استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی می‌بایست هزینه گرمایش محل مورد نظر با این سیستم بدست آمده و با هزینه گرمایشی سیستمی با سوخت گاز طبیعی مقایسه گردد.

شکل ۳ هزینه گاز بصورت ماهانه که از قبوض استخراج شده، هزینه مصرف برق در صورت استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی و نیز اختلاف این دو هزینه که معادل صرفه‌جویی ریالی در صورت استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به جای سیستم گرمایش با گاز طبیعی می‌باشد را نشان می‌دهد.



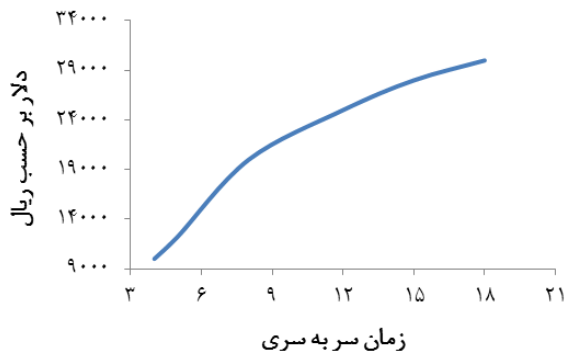
شکل ۳: مقایسه هزینه گرمایش با گاز، پمپ حرارتی و میزان صرفه‌جویی

میزان صرفه‌جویی خالص ماهانه و نیز سود انباشته در صورت استفاده از پمپ حرارتی برای گرمایش در طول یک سال نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به جای گاز برای گرمایش میزان ۶۶/۵۸ میلیون ریال برای هر سوله در سال صرفه‌جویی خواهد داشت.



شکل ۴: نمودار مقایسه‌ای صرفه‌جویی انباشته و ماهانه

شکل ۵ میزان سرمایه‌گذاری سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، صرفه‌جویی حاصل از این سیستم و حاشیه سود و زیان را با فرض نرخ ارز بازار آزاد ۲۰۰۰۰ ریالی نشان می‌دهد.



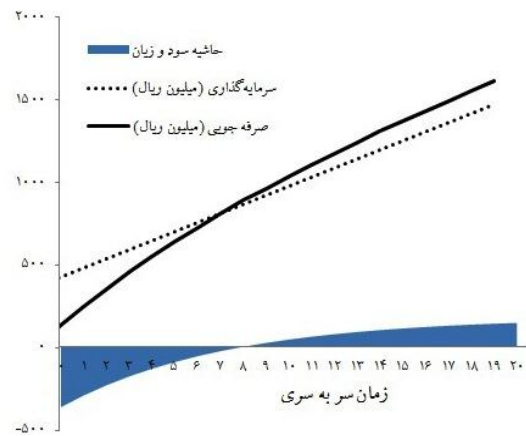
شکل ۷: نمودار بازگشت سرمایه با تغییرات ارز

نتیجه گیری کلی

در این مقاله امکان استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی در منطقه سردسیر شمالغرب ایران بررسی شده است. همچنین با انتخاب چیدمان اسلینکی افقی با در نظر گرفته مساحت زمین در دسترس و خصوصیات حرارتی-ساختاری زمین طول مبدل حرارتی زمینی با استفاده از روابط مربوطه ۱۵۰۰ متر محاسبه شده است. اطلاعات مربوط به داده‌های زمین شناسی، هواشناسی و آب‌های زیرزمینی جهت تعیین ضریب پخش حرارتی خاک و عمق یخبندان ضروری می‌باشد. مطابق تحلیل اقتصادی انجام شده در کار حاضر بر پایه قیمت ارز (۲۰۰۰۰ ریالی) و حامل‌های انرژی در ایران در مهرماه سال ۱۳۹۱، استفاده از یک پمپ حرارتی زمین گرمایی بازگشت سرمایه ۸ سال را خواهد داشت. شایان ذکر است که این محاسبات با نرخ ارز مرجع (۱۲۲۶۰ ریال)، بازگشت سرمایه مقدار ۵ سال محاسبه خواهد می‌شود. این میزان در کشورهایی که از یارانه انرژی استفاده نمی‌کنند به مراتب کمتر می‌باشد و وجود گاز ارزان و همچنین یارانه انرژی در کشورمان باعث افزایش مدت زمان سر به سری هزینه‌ها می‌گردد. به عنوان مثال بر اساس متوسط قیمت انرژی در کشورهای دیگر (همانند کشور ترکیه)، استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی دارای زمان بازگشت سرمایه گذاری کوتاهتری نسبت به ایران بوده و واجد صرفه اقتصادی می‌باشد.

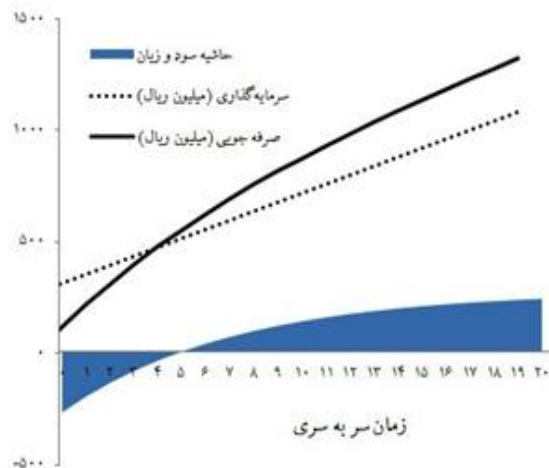
مراجع

- [1] Healy, P. F., Ugursal, V. I., 1997. "Performance and economic feasibility of ground source heat pump in cold climate", *International Journal of Energy Research*, Vol. 21, pp. 857-70.
- [2] Hepbasli, A., Akdemir, O., 2003. "Experimental study of a closed loop vertical ground coupled heat pump System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 527-48.
- [3] Inalli, M., Esen, H., 2004. "Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 2219-32.
- [4] Petit, P. J., Meyer, J. P., 1998. "Vertical ground-source heat pump compared to air-Source air conditioners in South Africa", *Energy*, Vol. 23, pp. 137-43.



شکل ۵: نمودار بازگشت سرمایه

شکل ۶ میزان سرمایه‌گذاری سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی، صرفه‌جویی حاصل از استفاده از این سیستم و حاشیه سود و زیان را با فرض نرخ ارز مرجع نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است با مقایسه نمودار شکل ۵ با شکل ۶ مشخص می‌شود که در صورت حمایت‌های دولتی از بخش انرژی‌های نو، این انرژی‌های از یک انرژی با صرفه اقتصادی بسیار پایین تبدیل به انرژی با صرفه اقتصادی قابل توجه می‌گردد. بطوریکه با نرخ ارز بازار آزاد و بدون حمایت دولت میزان صرفه‌جویی پس از ۲۰ سال بسیار اندک بوده و در حالیکه در صورت استفاده از نرخ ارز مرجع مقدار صرفه‌جویی قابل توجه بوده و سرمایه‌گذاری در این بخش را توجیه پذیر کرده و استفاده از این سیستم‌ها را دارای توجیه اقتصادی می‌کند.



شکل ۶: نمودار بازگشت سرمایه با دلار مرجع

شکل ۷ زمان سر به سری (بازگشت سرمایه) با تغییرات نرخ دلار برای سالهای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است با افزایش دلار بازگشت سرمایه در مدت زمان بیشتری صورت می‌گیرد.

- [12] Sanner, B., 2002. "Description of ground source types for the heating", *Gtv Bundesverband Geothemie*.
- [13] Ghosh, T. K., Prelas, M.A., 2011. "Energy resource and system", *Journal of Springer*, Vol. 2, pp. 1-719.
- [14] RETScreen® Engineering and Cases, 2001-2005. GROUND-SOURCE HEAT PUMP PROJECT ANALYSIS. www.retscreen.net, CA: Minister of Natural Resources Canada.
- [15] Said, S. A. M., Habib, M. A., Mokheimer, E. M. A., Al-Shayea, N., and Sharqawi, M., 2009. "Horizontal Ground Heat Exchange Design for Ground-Coupled Heat Pumps", *King Fahd University of Petroleum and Mineral*. pp. 1-8.
- [16] "International standards: Thermal performance of buildings- Heat transfer via the ground- Calculation methods," *2nd Edition*, ISO 13370:2007.
- [17] <http://www.tbtc.co.ir/fa/moarefiymoavenatha/moarefiymoavenatha/organization/nerkh90>.
- [۱۸] کریمی دستجرد، آیداء، ترابی، فرشاد، علیزاده، منصور، فرضی، بهمن، ۱۳۹۲. "بررسی اثر عمق کارگزاری لوله‌های مبدل حرارتی پمپ‌های زمین‌گرمایی روی هزینه سرمایه‌گذاری"، سومین کنفرانس انرژی‌های تجدید پذیر و تولید پراکنده.
- [19] Brealey, R.A., MYERS, S.C., 1996. "Principles of Corporate Finance," *McGraw-Hill, New York*.
- [5] Pulat, E., Coskun, S., Unlu, K., Yamankaradeniz, N., 2009. "Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate" *Energy*, Vol. 34, pp. 1284-95.
- [6] Fan, R., Jiang, Y., 2008. "Theoretical Study on the Performance of an Integrated Ground-Source Heat Pump in a Whole Year", *Energy*, Vol. 33, pp. 1671-79.
- [7] Ozgener, O., 2010. "Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agriculture and residential buildings", *Energy*, Vol. 33, pp. 262-68.
- [۸] صنایع، سپهر، نیرومند، بهزاد، ۱۳۸۸. "مدل‌سازی و بهینه‌سازی فنی و اقتصادی پمپ گرمایی با مبدل زمینی افقی"، اولین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع.
- [۹] نجات‌الهی، مصطفی، صیادی، حسین، مولایی کرمانی، احسان محمود، ۱۳۸۸. "مقایسه اقتصادی دفع حرارت سیستم‌های سرمایش به هوا و زمین"، هفتمین همایش ملی انرژی.
- [۱۰] یاری، مرتضی، جوانی، نادر، انصاری، علیرضا، ۱۳۸۹. "ارزیابی اقتصادی پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی"، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی برق.
- [۱۱] صنایع، سپهر و همکاران، ۱۳۸۵. "مروری بر پمپ‌های حرارتی با منبع زمینی، کاربرد و مزایا"، پنجمین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان.