Journal of Sustainable Energy Systems

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

Research Paper

Sustainable energy supply for medical plant growth using geothermal energy and heat pump

Rahim Zahedi[1], Arina Alipour[2], Yeganeh Salehi[3], Saba Seyfi[4], Masood Ahmadi[5], Abolfazl Ahmadi*[6], Aidin shaghaghi[7], Abdolreza Zahedi[8]

[1]Department of Renewable Energies and Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
[2]Institute of Medicine, RUDN University, Moscow, Russia
[3]Faculty of New Sciences and Technology, University of Isfahan, Isfahan, Iran
[4]Faculty of General Medicine, University of Debrecen, Debrecen, Hungary
[5]Faculty of Medicine, Qom University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[6]Department of Energy Systems Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[7]Department of Energy Systems Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[8]School of Rehabilitation Sciences, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 08 October, 2022
Revised 17 November, 2022
Accepted 07 Decemberb, 2022

Keywords:
Geothermal energy,
cultivation of industrial hemp plant,
greenhouse,
renewable energy

ABSTRACT

This research simulates a geothermal heat pump system needed to grow hemp plants for medical applications in Ardabil, Iran. Supplying energy for the cultivation of hemp plants can sometimes impose many costs. On the other hand, it is impossible to ignore the release of carbon dioxide to produce energy for the cultivation of this plant. In this regard, in this article, we will check the performance of a geothermal heat pump system and evaluate its output for cultivating the Hemet plant in the greenhouse. The results show that considering the cultivation of industrial hemp twice a year, the equivalent of 17.74 to 26.62 tons of carbon dioxide is saved per hectare. According to the 4 hectares under cultivation in the designed greenhouse, a figure equal to 70.96 to 106.48 tons of carbon dioxide per year is stored due to hemp plant cultivation in the greenhouse. In addition, using a heat pump system equivalent to 6.64 tons of oxide prevents the emission of greenhouse gases through renewable energy, which creates a negative carbon greenhouse system. Also, the heat capacity of the geothermal pump to supply energy to the greenhouse is equal to 570.2 kilowatts, which is dependent on the height and optimal temperature of the greenhouse. With the increase of these design parameters, the required heat capacity also increases.

Introduction

Hemp is the name of the flower buds and leaves of the hemp plant, which contains psychoactive and therapeutic oils. Humans have used these oils for medicinal and recreational purposes for thousands of years. Historically, hemp crops are grown in some markets for almost every country worldwide. While in some others, they are prohibited, about 30 countries in Europe, Asia, and South America allow farmers to grow hemp, according to a 2012 US Congressional Research Service report on hemp as a global agricultural commodity. In some instances, Hemp can also be used as an alternative to wood pulp; it is frequently used in papermaking and is a sustainable alternative to fiberglass insulation in buildings. In 2021, total US Imports of selected hemp products were estimated to be over ten million dollars, including seeds, oil, fiber, and products made from these materials. Some of the largest hemp-producing countries in the world include China, Russia, Korea, Canada, Chile, France, Britain, Romania, and Hungary. At the turn of the century, the world's industrial hemp harvest was estimated at more than 70,000 hectares annually. The Drug and Crime Agency estimated that global marijuana cultivation is between 470,000 and 600,000 hectares per year, which is almost ten times the production of hemp. In 2006, most marijuana was produced in America (55%) and Africa (22%), followed by Asia and Europe. The largest eradication of hemp in the world was produced in Mexico, over 30,000 hectares (United Nations, 2008); hemp is a very valuable plant that grows in almost all inhabited areas. It can be cultivated with relatively little maintenance in large, small, and indoors.

* Corresponding Author Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

Model description

The overall schematic of the evaluated system is shown in Figure 1.

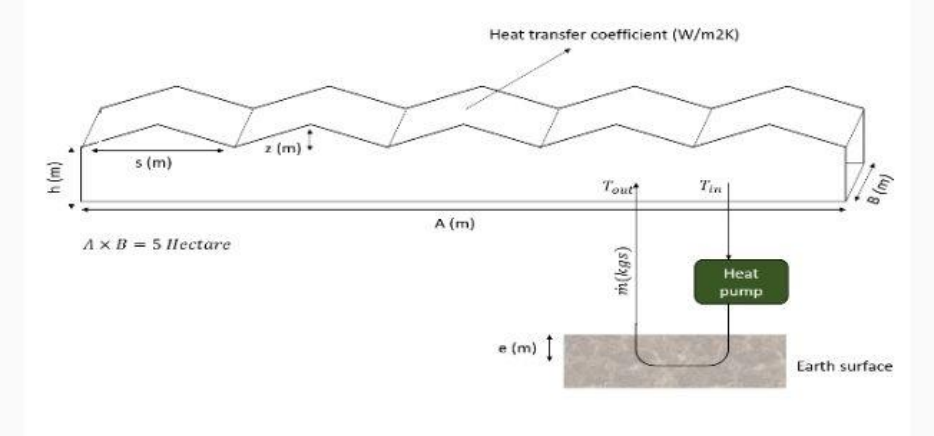


Fig. 1. General schematic of the greenhouse system

Table 1. Values used in greenhouse design

Row	Parameter	The amount of	the unit
1	Greenhouse area	5	hectares
2	The length of the greenhouse	500	Meter
3	The width of the greenhouse	100	Meter
4	The height of the greenhouse	5	Meter
5	Heat transfer coefficient of the walls (double polycarbonate)	0.6	Btu/hr-ft2-°F
6	The temperature inside the greenhouse is suitable for hemp cultivation	70	Fahrenheit
7	Ambient temperature in the coldest time (Ardabil design temperature)	17	Fahrenheit
8	coefficient of air change	0.7	-
9	Hemp planting times per year	2	-

No heat pump ever constructed can outperform the Carnot cycle. The vapor compression cycle in heat pumps is one of the cycles used to achieve a higher Coefficient of Performance (COP). Vapor compression is one of the methods used for heat pumping. There are various methods for transferring heat between two heat sources, and as mentioned, the vapor compression cycle is one of these methods. Refrigeration cycles, absorption cycles, gas compression, and thermoelectric methods are also available. These methods generally require some form of mechanical, electronic, or thermal energy input to operate. A suitable definition can be provided for the Coefficient of Performance (COP). The ratio of energy delivered (E) to the input work energy (Q) is a general measure of the efficiency of a heat pump. This ratio goes by various names, such as COP, heating coefficient, heat output ratio, performance ratio, and energy ratio, with COP being the most commonly used term. For a heating unit to be useful, its COP must be greater than one, and the higher this value, the more efficient the heat pump will be. For large machines that operate between heat sources with a significant temperature difference, COP values between 5 and 6 can be achieved.

For small units that utilize outside air as their heat source, a Coefficient of Performance (COP) typically falls between 2 and 3. When a heat pump unit is in cooling mode and the thermostat is set for cooling, heat is absorbed from the indoor air. This process occurs by evaporating the refrigerant in the indoor coil. Consequently, the indoor air becomes cooler, and its humidity is removed. The conditioned air is then distributed to the required space through the ductwork system. The refrigerant vapor is cooled, transformed into a liquid, returned to the indoor coil, and the cycle repeats. The heating mode operates similarly.

Results and discussion

As a product, the hemp plant is compatible with the environment and grows quickly compared to trees and other plants. Industrial hemp requires limited maintenance, and due to its deep rooting characteristics, carbon CO2 increases from the early stages of soil absorption during reclamation cultivation. Considering the high potential of hemp cultivation in attracting cranes, we designed a greenhouse for growing hemp plants in this study. To prevent the emission of greenhouse gases caused by the consumption of fossil fuels, we used

geothermal energy to supply energy to the greenhouse, and for this purpose, we designed a geothermal heat pump system; the results showed that considering 2 times plant cultivation industrial hemp is stored every year, equivalent to 17.74 to 26.62 tons of carbon dioxide per hectare. According to the 4 hectares under cultivation in the designed greenhouse, a figure equal to 70-96 to 106-48 tons of carbon dioxide per year is stored due to the cultivation of the hemp plant in the greenhouse. Also, the capacity of the geothermal heat pump to supply energy to the greenhouse is equal to 570.2 kW, which depends on the height and optimal temperature of the greenhouse. With the increase of these design parameters, the required capacity of the heat pump also increases.

فصلنامهٔ سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: https://ses.ut.ac.ir

مقالهٔ پژوهشی

تأمین انرژی پایدار برای رشد گیاهان دارویی با استفاده از انرژی زمین‌گرمایی و پمپ حرارتی

رحیم زاهدی[۱]، آرینا علیپور[۲]، یگانه صالحی[۳]، صبا سیفی[۴]، مسعود احمدی[۵]، ابوالفضل احمدی[۶*]، آیدین شقاقی[۷]، عبدالرضا زاهدی[۸]

[۱] دکترای تخصصی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] دانشجوی دندان‌پزشکی، دانشکدهٔ پزشکی، دانشگاه رودن، مسکو، روسیه

[۳] دانشجوی پزشکی نوین، دانشکدهٔ فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

[۴] پزشک عمومی، دانشکدهٔ پزشکی، دانشگاه دبرسن، دبرسن، مجارستان

[۵] پزشک عمومی، دانشکدهٔ پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی قم، قم، ایران

[۶] دانشیار، گروه سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

[۷] کارشناسی ارشد، گروه سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

[۸] استادیار، دانشکدهٔ علوم توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۷/۱۶

تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۸/۲۶

تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

کلیدواژه:

انرژی زمین‌گرمایی،

پرورش گیاه همپ صنعتی،

گلخانه،

انرژیهای تجدیدپذیر

چکیده

در این پژوهش، یک سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به منظور تأمین انرژی مورد نیاز پرورش گیاه همپ برای کاربردهای پزشکی در اردبیل شبیه‌سازی می‌شود. تأمین انرژی پرورش گیاه همپ در مواقعی می‌تواند هزینه‌های زیادی را تحمیل کند. از طرفی، نمی‌توان از انتشار کربن‌دی‌اکسید ناشی از مصرف انرژی برای پرورش این گیاه چشم‌پوشی کرد. در همین راستا، در این مقاله قصد داریم عملکرد یک سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را بررسی کنیم و خروجی آن را برای پرورش گیاه همپ در گلخانه مورد ارزیابی قرار دهیم. نتایج نشان می‌دهد با در نظر گرفتن ۲ بار کشت گیاه همپ صنعتی در هر سال، معادل ۱۷/۷۴تا ۲۶/۶۲ تن کربن‌دی‌اکسید در هر هکتار ذخیره می‌شود. با توجه به ۴ هکتار زیر کشت محصول در گلخانه طراحی شده، رقمی معادل ۷۰/۹۶ تا ۱۰۶/۴۸ تن در سال کربن‌دی‌اکسید در نتیجهٔ کشت گیاه همپ در گلخانهٔ مورد نظر ذخیره می‌شود. علاوه بر این، استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی معادل ۶/۶۴ تن کربن‌دی‌اکسید به واسطهٔ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری به عمل می‌آورد که این باعث تشکیل یک سیستم گلخانه‌ای کربن منفی می‌شود. همچنین، ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی برای تأمین انرژی گلخانه برابر با ۵۷۰/۲ کیلووات است که این مقدار وابسته به ارتفاع و دمای مطلوب گلخانه است و با افزایش این پارامترهای طراحی، ظرفیت مورد نیاز پمپ حرارتی نیز افزایش پیدا میکند.

مقدمه

همپ نام جوانه‌های گل و برگ‌های گیاه شاهدانه است که حاوی روغن‌های روان‌گردان و درمانی است. هزاران سال است که انسان‌ها در سراسر جهان از این روغن‌ها برای مقاصد دارویی استفاده می‌کنند. از نظر تاریخی برای تقریباً هر کشور در سراسر جهان، محصولات شاهدانه در برخی بازارها رشد می‌کنند، در حالی که در برخی دیگر ممنوع هستند. همپ همچنین می‌تواند به عنوان جایگزینی برای خمیر چوب در برخی موارد استفاده شود. اغلب در کاغذسازی استفاده می‌شود و جایگزینی پایدار برای عایق

*نویسندهٔ مسئول

Email: a_ahmadi@iust.ac.ir

فایبرگلاس در ساختمان‌ها است. بر اساس گزارش سرویس تحقیقاتی کنگرهٔ ایالات متحده در سال ۲۰۱۲ در مورد شاهدانه به عنوان یک کالای کشاورزی جهانی، حدود ۳۰ کشور در اروپا، آسیا و آمریکای شمالی و جنوبی به کشاورزان اجازهٔ پرورش شاهدانه می‌دهند. در سال ۲۰۲۱، ارزیابی کل واردات ایالات متحده از محصولات منتخب کنف به ارزش بیش از ده میلیون دلار، شامل دانه‌ها، روغن‌ها، فیبر و محصولات ساخته‌شده از این مواد بود. برخی از بزرگ‌ترین کشورهای تولیدکنندهٔ شاهدانه در جهان عبارت‌اند از: چین، روسیه، کره، کانادا، شیلی، فرانسه، بریتانیا، رومانی و مجارستان. در آغاز قرن، برداشت صنعتی کنف در جهان بیش از ۷۰ هزار هکتار در سال تخمین زده می‌شد. سازمان مواد مخدر و جرم و جنایت سطح جهانی زیر کشت ماری جوانا را بین ۴۷۰ تا ۶۰۰ هزار هکتار در سال تخمین زد که تقریباً ده برابر تولید کنف است. در سال ۲۰۰۶، بیشترین ماری جوانا در قارهٔ آمریکا (۵۵ درصد) و در آفریقا (۲۲ درصد) و پس از آن آسیا و اروپا تولید شد. بزرگ‌ترین ریشه‌کن کردن شاهدانه در جهان به بیش از ۳۰ هزار هکتار در مکزیک تولید شد (سازمان ملل متحد، ۲۰۰۸). شاهدانه یک گیاه بسیار ارزشمند است که تقریباً در تمام مناطق مسکونی جهان رشد می‌کند. می‌توان آن را با نگهداری نسبتاً کمی در مزارع بزرگ، در زمین‌های کوچک و داخل خانه کشت کرد. کنف صنعتی در بازار جهانی در تولید فیبر و محصولات بذری رقابت می‌کند. بر اساس گزارش جهانی مواد مخدر در سال ۲۰۰۸، «ماری جوانا و حشیش بر صنعت مواد مخدر غیرقانونی جهان تسلط دارند» و علی‌رغم ممنوعیت، «این بازار طیف بسیار گسترده‌ای از مصرف‌کنندگان از نظر سن، درآمد، سبک زندگی، قومیت و ملیت دارد.» در حالی که تولید صنعتی انواع شاهدانه دارای پتانسیل گسترش در بازارهای بین‌المللی است، ماری جوانا معمولاً به صورت محلی تولید و مصرف می‌شود.

سه مرحلهٔ متمایز از رشد گیاه وجود دارد که برای ملاحظات یک کشت‌کننده در فضای داخلی مهم است: مرحلهٔ کلون، مرحلهٔ رویشی و مرحلهٔ گلدهی. کلون‌ها با برداشتن قلمه از یک گیاه مادر در مرحلهٔ رویشی رشد ساخته می‌شوند و از نظر ژنتیکی با مادر خود یکسان هستند [۱]. این قلمه‌ها با نگه داشتن آن‌ها در یک محیط مرطوب و گرم و احتمالاً افزودن هورمون رشد ریشه یا سایر مواد مغذی به محلول آبیاری آن‌ها باعث ایجاد ریشه می‌شوند. کلون‌ها به نور با شدت بالا نیاز ندارند. آن‌ها گیاهان نابالغی هستند که بین ۱۲ تا ۱۸ ساعت نور در روز نیاز دارند. هنگامی که کلون‌ها ریشه‌های سالمی را ایجاد کردند، آن‌ها را در ظروف بزرگ‌تر (برای تولید مبتنی بر خاک) گلدان میکنند و ۱۸ ساعت در روز زیر روشنایی قرار می‌دهند [۲]. پرورش‌دهندگان باید توجه زیادی به رشد و نمو گیاهان در مرحلهٔ رویشی رشد خود داشته باشند تا تعیین کنند که چه زمانی برای گلدهی بالغ هستند. هنگامی که نشانه‌هایی وجود دارد که گیاه بالغ است، ممکن است با تغییر مقدار نور دریافتی در روز، گلدهی شود [۳].

تلاش‌های روزافزون برای اجرای ممنوعیت شاهدانه باعث شده است که روش‌های کشت به طور فزاینده‌ای ناکارآمد باشد. نیاز یک پرورش‌دهنده به مخفی کردن محصول خود هزینهٔ زیادی زمان، انرژی و هزینه دارد تا خطر گرفتار شدن را به حداقل برساند. از آنجا که قیمت‌های ماری جوانا در بازار سیاه بالا است، انگیزهٔ زیادی برای سرمایه‌گذاری در ریسک وجود دارد. زغال سنگ و گاز طبیعی دو مورد از سوخت‌های نفتی هستند که برای تولید برق در ایالات متحده استفاده می‌شوند. هنگامی که این سوخت‌های فسیلی احتراق می‌شوند، دی‌اکسید کربن (CO_2) و سایر گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها در جو زمین آزاد می‌شوند [۴]. هنگامی که برق تولیدشده از سوخت‌های فسیلی برای کشت همپ استفاده می‌شود، افزایش خالص دی‌اکسید کربن به محیط زیست اضافه می‌شود. گیاهانی که در فضای باز رشد می‌کنند از دی‌اکسید کربن موجود در هوای اطراف در واکنش‌های فتوسنتزی ناشی از نور خورشید استفاده می‌کنند و زمانی که گیاه مصرف (تنفس سلولی) یا تجزیه می‌شود، مقداری معادل دی‌اکسید کربن را به محیط باز می‌گرداند [۵].

کنف به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و تمام قسمت‌های گیاه ارزشمند است. از الیاف همپ در بازارهای زیر استفاده میشود:

- ✓ بازار کاغذ: بیش از ۱۸ هزار تن در سال از الیاف کنف برای تولید کاغذها (بسیار ریز و مقاوم) استفاده میشود.

- ✓ بازار عایق پشم همپ: بیش از ۲ هزار تن در سال از الیاف همپ برای تولید عایق برای ساختمان‌ها استفاده میشود.
- ✓ بازار پلاستیکهای با منبع زیستی: ۴۰۰ تا ۶۰۰ تن در سال از الیاف همپ برای ایجاد ترکیبات (شامل کنف، پلی‌پروپیلن و مواد افزودنی) استفاده می‌شود که با کاهش وزن ۲۰ درصد و در نتیجه به حداقل رساندن قابل ملاحظه انتشارCO_2 و مصرف سوخت مشخص میشود.
- ✓ بازار ترمو فشرده غیر بافته: ۱۵ درصد از الیاف کنف تولیدشده در فرانسه در این بازار تجاری شده است که به صنعت خودرو به‌ویژه برای ساخت خودرو در اروپا اختصاص دارد [۶]. چوب ساقهٔ همپ در بازارهای زیر استفاده میشود:
- ✓ بازار بستر حیوانات: بیش از ۱۵ هزار تن در سال از گردهای همپ به دلیل ویژگی‌های رنگ، بو، قدرت نگهداری و عایق بودن برای بستر حیوانات، به‌ویژه برای اسبها استفاده می‌شود.
- ✓ بازار مالچ‌پاشی باغبانی: بیش از ۶ هزار تن در سال برای مالچ‌پاشی باغبانی برای جلوگیری از رشد علف‌های هرز و حفظ رطوبت خاک و همچنین برای جلوگیری از علف‌های هرز توسط افراد و متخصصان استفاده میشود.
- ✓ بخش ساختمان: حدود ۵ هزار تن در سال مصرف میکند. به مدت ۲۰ سال، صنعت همپ روی ساخت بتن کنفی از طریق انجمن Construire en Chanvre کار می‌کند که دستورالعمل‌های حرفه‌ای را ایجاد می‌کند، افراد حرفه‌ای را تشکیل می‌دهد و استفاده از بتن کنفی را در ساختمان‌ها ترویج می‌کند. برچسب ساختمان کنفی[1] کیفیت مواد اولیه بتن کنفی را تضمین می‌کند. مزایای اصلی ساخت بتن کنفی عبارت‌اند از: عملکرد حرارتی و رطوبت گرمایی، پایداری آتش، اجرای آکوستیک، مقاومت در برابر جوندگان، پایداری لرزه‌ای و معماری نور.

از بذرها در بازارهای زیر استفاده میشود:

- ✓ بازار پرندگان و ماهیگیری: دانه به عنوان طعمه برای ماهی یا پرندگان عمل میکند.
- ✓ بازار تغذیهٔ انسان: از آنجا که همپ، چه به صورت دانهٔ کامل یا پوسته‌پوسته‌شده، آرد، روغن یا غذا مصرف شود، دارای ویژگی‌های تغذیه‌ای نامشخصی است.
- ✓ بازار لوازم آرایشی و بهداشتی: این بازار نوظهور عمدتاً شامل روغن است، به‌ویژه سرشار از امگا ۳، امگا ۶ و توکوفرول (ویتامین E). همیشه به خاطر قدرت مرطوب‌کنندگی آن شناخته شده است.

محیط اطراف منابع انرژی بسیار بزرگ و ارزانی را در اختیار می‌گذارد. یکی از این منابع، انرژی زمین‌گرمایی است و یکی از راه‌های بهره‌برداری از این منبع انرژی، پمپ حرارتی زمین‌گرمایی است. این وسیله که برای گرمایش، سرمایش و تأمین آب گرم مصرفی ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، با زمین تبادل گرما می‌کند [۷]. دمای زمین، به عنوان چشمه یا چاه گرمایی، در مقایسه با سیستم‌های تهویهٔ مطبوع هوایی، طی سال تقریباً ثابت و به دمای مطلوب محیط تهویه‌شده نزدیک‌تر است. به همین دلیل، این سیستم‌ها در مقایسه با بسیاری سیستم‌های دیگر، بازدهی بیشتری دارند و انرژی کمتری مصرف می‌کنند. مزایای اصلی این سیستم‌ها عبارت‌اند از: مصرف کمتر انرژی، طرح ساده‌تر، نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری و نداشتن آلایندگی. معایب آن‌ها هم مربوط به بالا بودن هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به سایر سیستم‌های تهویهٔ مطبوع، کمبود طراحان متخصص و کمبود پیمان‌کاران باتجربه برای نصب و راه‌اندازی این سیستم‌ها هستند [۸]. بخش مهمی از هزینهٔ سرمایه‌گذاری در پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی مربوط به مبدل حرارتی زمینی است. این بخش شامل هزینهٔ حفاری و پر کردن کانال زمینی، پمپ سیرکولاتور، سیال ضد یخ (در مناطق سردسیر)، لوله‌های پلی‌اتیلنی و نصب آن‌ها است. بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد گرچه سرعت بازگشت سرمایهٔ پروژه‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی کم است، اما برای استفاده در دورهٔ ۵ تا ۷ سال توجیه اقتصادی دارد [۹]. در سال ۱۹۱۲ برای نخستین‌بار ایدهٔ استفاده از زمین به عنوان منبع گرما مطرح شد و نخستین پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی در اواسط دههٔ ۱۹۴۰ در آمریکا و انگستان نصب شدند. بنابراین، استفاده از این

1. Chanvre Batiment

پمپ‌ها در دنیا سابقهٔ طولانی‌مدت دارد، اما به‌کارگیری آن‌ها در ایران روشی نوین است. در واقع، با توجه به رشد مصرف انرژی و افزایش قیمت برق در سال‌های اخیر، مطالعات فنی و اقتصادی و امکان‌سنجی استفاده از این سیستم‌ها در ایران آغاز شده، به طوری که در حال حاضر، این سیستم در پنج شهر اهواز، بندرعباس، رشت، طالقان و مشکین‌شهر نصب شده و توسط سیستم یادشده در حالت سرمایشی ۵۰ درصد و در حالت گرمایشی ۷۰ درصد مصرف برق کاهش داده شده است. پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های آینده، این سیستم‌ها جایگاه مناسبی بین سیستم‌های تهویهٔ مطبوع در کشورمان به دست آورند. طی دو دههٔ اخیر مطالعات بسیاری در زمینهٔ طراحی و مدل‌سازی، تست و ارزیابی کارایی و مقایسه و امکان‌سنجی فنی ـ اقتصادی پمپ‌های گرمایی ژئوترمال انجام یافته است. اسن [۱۰] یک سیستم پمپ حرارتی زمینی با مبدل افقی را برای استفادهٔ گرمایشی در منطقه‌ای در شرق ترکیه از لحاظ فنی و اقتصادی ارزیابی کرده است. او تحلیل اقتصادی مفصلی ارائه داده و زمان بازگشت سرمایهٔ سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را با شش روش گرمایش دیگر (مقاومت الکتریکی، مازوت، گاز مایع، زغال سنگ، نفت، و گاز طبیعی) مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده است که در این حالت، سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از لحاظ اقتصادی از پنج روش گرمایشی اول بهتر است، اما جایگزین اقتصادی مناسبی برای سیستم گرمایش با استفاده از گاز طبیعی نیست. رومانوف [۱۱] استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را در آب‌وهوای سرد از لحاظ فنی و اقتصادی امکان‌سنجی کرده است. او تأثیر پارامترهای مختلف سیستم را بر کارایی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با استفاده از یک مدل رایانه‌ای بررسی کرده و نیز یک ارزیابی اقتصادی قیاسی به منظور امکان‌سنجی استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به جای سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی دیگر انجام داده است [۱۲]. نتایج نشان داده‌اند پمپ حرارتی زمین‌گرمایی از لحاظ اقتصادی از سیستم‌های دیگر بهتر است و پارامترهای مختلف این سیستم تأثیر به‌سزایی بر کارایی آن دارند. پتیت [۱۳] قابلیت اقتصادی پمپ گرمایی ژئوترمال با مبدل زمینی عمودی و مبدل زمینی افقی را با سیستم‌های تهویهٔ مطبوع هوایی در آفریقای جنوبی مقایسه کرده است. او هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و عمق بهینهٔ چاه‌های مبدل زمینی را محاسبه کرده است. همچنین، ظرفیت‌های گرمایشی و سرمایشی ماهیانه و ضریب عملکرد را به منظور تعیین هزینه‌های عملکردی ارزیابی کرده است. سرانجام زمان بازگشت سرمایه، ارزش فعلی خالص و سرعت بازگشت داخلی را به دست آورده و نتیجه گرفته است که استفاده از پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با هر دو مبدل زمینی عمودی و افقی، ارزان‌تر و اقتصادی‌تر از سیستم تهویهٔ مطبوع هوایی است [۱۴]. سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، بسته به اینکه از زمین، آب زیرزمینی یا آب سطحی به عنوان چشمه یا چاه گرمایی استفاده کنند، به سه نوع حلقهٔ بسته، حلقهٔ باز و حلقهٔ دریاچه‌ای تقسیم می‌شوند.

۱. سیستم‌های حلقهٔ باز یا پمپ‌های حرارتی بامنبع آب زمینی

در این سیستم‌ها، آب برگرفته از منابع آب زمینی (آب‌های سطحی و سفره‌های زیرزمینی) به عنوان سیال حامل گرما، مستقیم به پمپ حرارتی ارسال می‌شود و پس از تبادل حرارتی با پمپ حرارتی، دوباره به زمین برگردانده می‌شود.

۲. سیستم‌های پمپ‌های حرارتی با منبع آب سطحی

مبدل زمینی این گونه سیستم‌ها متشکل از شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی است که برای تأمین تبادل گرمای مورد نیاز در آب فرو برده شده است. این سیستم‌ها گرمازدایی را با کارایی بیشتری نسبت به گرمازایی انجام می‌دهند، بنابراین استفاده از آن‌ها در مناطق گرمسیر متداول‌تر است. البته ساختمان باید در نزدیکی منابع آب مناسب قرار داشته باشد.

۳. سیستم‌های حلقهٔ بسته یا پمپ‌های حرارتی متصل به زمین

در این سیستم‌ها، مبدل حرارتی زمینی متشکل از شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی به صورت افقی در یک ترانشه یا به طور عمودی در یک چاه قرار می‌گیرد و سیال حامل گرما در آن‌ها به گردش درمی‌آید و حرارت را از زمین به پمپ حرارتی (یا به‌عکس) منتقل می‌کند. در این حالت، سیال حامل گرما توسط دیوارهٔ مبدل حررتی از خاک، سنگ یا آب زیرزمین جدا شده که آن را تبدیل به یک سیستم بسته

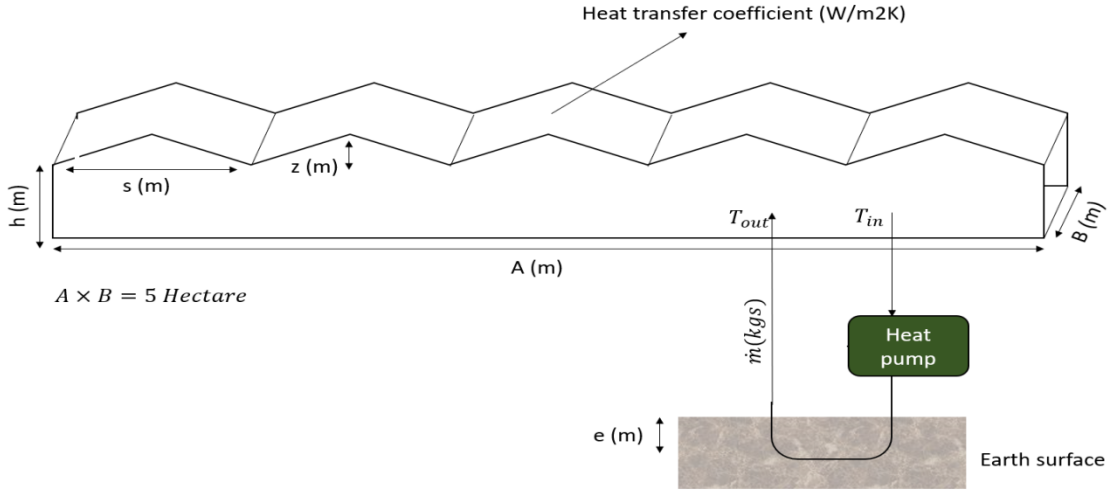
می‌کند [۱۵]. هزینهٔ نصب این‌گونه سیستم‌ها از انواع دیگر آن بالاتر است، اما در اکثر مکان‌ها و برای سیستم‌هایی با ظرفیت‌های مختلف قابل استفاده هستند. در میان سیستم‌های حلقهٔ بسته، مبدل‌های زمینی عمودی به دلیل نفوذ در عمق بیشتر زمین و تماس با خاک زمین در عمق زیادتر که دمای نسبتاً ثابتی طی سال دارد، کارایی بیشتری دارند و برای نصب آن‌ها، مساحت کمتری از سطح زمین مورد نیاز است [۱۶]. در مقابل، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیهٔ آنها بیشتر از مبدل‌های افقی است.

اگر روش فناورانه‌ای به کار گرفته شود تا کربن‌دی‌اکسید حاصل از تأمین انرژی مورد نیاز پرورش گیاه در محیط‌های داخلی توسط خود گیاه مصرف شود، خالص انتشار کربن‌دی‌اکسید به اتمسفر می‌تواند به صفر نزدیک شود. در این مطالعه یک سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی جهت تأمین انرژی مورد نیاز پرورش گیاه همپ برای کاربردهای پزشکی شبیه‌سازی شده و مصرف کربن‌دی‌اکسید حاصل از پرورش گیاه همپ محاسبه می‌شود. طراحی به گونه‌ای انجام می‌شود که ظرفیت تولید حرارت از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی برای مصرف گیاه مناسب باشد.

روش‌شناسی

شماتیک کلی سیستم مورد ارزیابی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مقادیر به‌کاررفته در طراحی گلخانه در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک کلی سیستم گلخانه

جدول ۱. مقادیر به‌کاررفته در طراحی گلخانه

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	مساحت گلخانه	۵	هکتار
۲	طول گلخانه	۵۰۰	متر
۳	عرض گلخانه	۱۰۰	متر
۴	ارتفاع گلخانه	۵	متر
۵	ضریب انتقال حرارتی دیوارهها (پلی‌کربنات دوبل)	۰,۶	Btu/hr-ft2-°F
۶	دمای داخل گلخانه مناسب پرورش گیاه همپ[1]	۷۰	فارنهایت
۷	دمای محیط در سردترین زمان (دمای طراحی اردبیل)	۱۷	فارنهایت
۸	ضریب تعداد تغییرات هوا[2]	۰/۷	-
۹	دفعات کشت گیاه همپ در سال	۲	-

1. https://www.rimolgreenhouses.com/blog/create-ideal-cannabis-growing-conditions-greenhouse
2. https://www.greenhousemag.com/article/technology-determining-greenhouse-heat-loss/

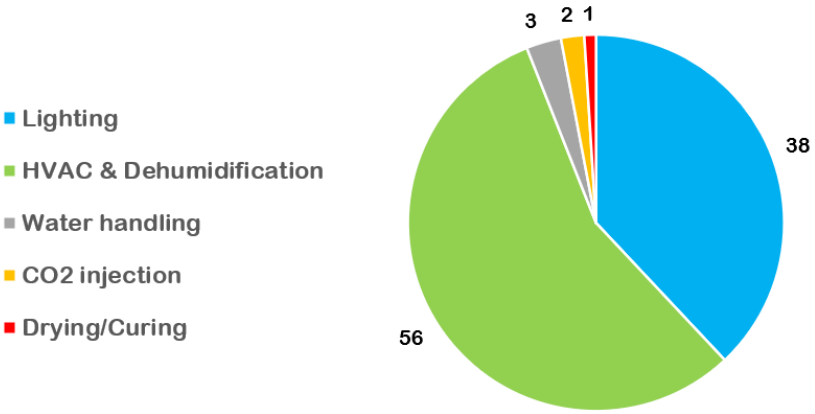
رشد گیاه همپ

گیاه همپ از قدیمی‌ترین محصولات زراعی در جهان است که به طور سنتی به دلیل الیاف پایه‌بلندش کشت می‌شود، اگرچه می‌توان آن را برای الیاف کوتاه نیز کشت کرد. الیاف همپ الیاف اصلی مورد استفاده برای طناب‌ها و بادبان‌های دریایی برای قرن‌ها بود. علاوه بر این، کانابینوئیدهای حاصل از دانهٔ شاهدانه برای اهداف دارویی، معنوی و تفریحی استفاده شده است. همپ اهمیت خود را به عنوان یک مادهٔ خام برای مواد نساجی از دست داده و با پنبه و الیاف مصنوعی جایگزین شده است. با این‌حال، به‌تازگی به همپ به عنوان یک مادهٔ عایق و همچنین، به عنوان مادهٔ اولیه برای کاغذهای تخصصی نگاه شده در حال حاضر ۱۵ هزار هکتار در اروپا کشت می‌شود. زیست‌تودهٔ همپ دارای خواص احتراق خوبی بوده و می‌تواند برای تولید گرما یا برق استفاده شود [۱۷]. بنابراین، همپ پتانسیل یک محصول انرژی کارآمد را ارائه می‌کند و به کشاورزان امکان بهره‌برداری از بازارهای جدید در گرما و برق‌زیستی را برای ۱۵ تا ۲۰ سال ارائه می‌دهد.

روش‌های کشت در درجات مختلف تأثیر اجتناب‌ناپذیری بر محیط زیست دارد. کشت در فضای باز روش سنتی و اصیل کشت همپ است. مدیریت نامناسب خاک و منابع آب و کنترل آفات ممکن است باعث ایجاد مسائل زیست‌محیطی حیاتی در روش کشت سنتی شود. به‌عکس، کشت گلخانه‌ای کنترل کامل بر تمام جنبه‌های گیاهان، مانند نور و دما را امکان‌پذیر می‌کند، اما به دلیل هزینه‌های بالاتر، تقاضای انرژی و پیامدهای زیست‌محیطی مرتبط با آن محدود میشود.

استفاده از انرژی در کشت همپ در محیط گلخانه‌ای از طیف وسیعی از تجهیزات ناشی می‌شود که به دو دستهٔ اصلی تقسیم می‌شوند: روشنایی و کنترل دقیق شرایط محیط زیر کشت.

برای رشد گیاهان همپ و در نتیجه، سودآوری برای پرورش‌دهندگان، چندین ابزار انرژی‌بر به طور منظم استفاده می‌شود. تقاضای انرژی برای کشت همپ در فضای داخلی ۶۰۷۴ کیلووات ساعت کیلوگرم گزارش شده است. شکل ۲ مصرف نهایی برق را بر اساس مطالعهٔانجام‌شده توسط شورای حفاظت و انرژی شمال غرب (NPCC 2014) نشان می‌دهد. در این میان، روشنایی، تهویهٔ مطبوع (گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع) و رطوبت‌زدایی ۹۴ درصد از کل مصرف نهایی برق را تشکیل می‌دهند.



شکل ۲. مصرف نهایی برق

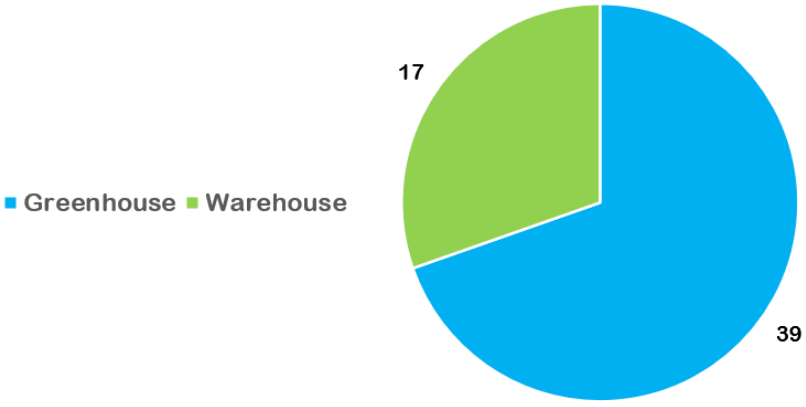
به دلیل رشد بسیار سریع گیاه همپ در کشت گلخانه‌ای، زیست‌تودهٔ انباشته‌شده توسط این گیاه تأثیر قابل توجهی در جذب CO2 جوی دارد. همپ صنعتی از نظر علمی ثابت شده است که CO2 بیشتری را در هر هکتار نسبت به هر محصول جنگلی یا تجاری جذب میکند و بنابراین، یک مخزن کربن ایده‌آل است. CO2 به طور دائم در الیافی که برای هر چیزی از منسوجات گرفته تا مصالح ساختمانی استفاده می‌شود، ذخیره می‌شود. همپ صنعتی را می‌توان به طور مداوم دوباره کاشت و به این ترتیب، معیارهای ماندگاری محصول را مطابق با پروتکل کیوتو برآورده می‌کند. یک هکتار همپ صنعتی میتواند ۲۲ تن CO2 را جذب کند. امکان رشد ۲ بار در سال در شرایط خاک مناسب وجود دارد و توانایی همپ برای رشد سریع، تا ۴ متر در ۱۰۰ روز، آن را به یک

محصول کاندید عالی برای جداسازی CO2 و حفظ کربن خاک تبدیل میکند.

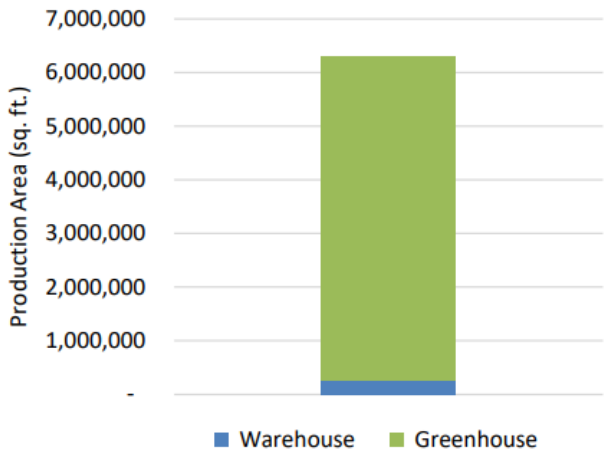
زیست‌تودهٔ گیاهی با تبدیل فتوسنتزی کربن اتمسفر برای تشکیل کربوهیدرات‌هایی تولید می‌شود که به مناطق گیاهی که نیاز به رشد دارند منتقل می‌شوند. جذب کربن همپ را می‌توان با محاسبات به‌دست‌آمده از بازده وزن خشک تأیید کرد. کل وزن تازهٔ زیست‌توده در باسکول به دلایل تجاری و مجوز قبل از پردازش و وزن خشک پس از پردازش برای انطباق ثبت می‌شود. ارقام دقیقی برای بازده زیست‌تودهٔ کل و جذب کربن را می‌توان به دست آورد، که سطحی از قطعیت را ارائه می‌دهد که از طریق هیچ فرایند جذب کربن طبیعی دیگری مانند جذب کربن برای کاشت درخت در دسترس نیست.

در کانادا، تولیدکنندگان دارای مجوز از بهداشت کانادا[1] از سال ۲۰۱۴ توانسته‌اند همپ را برای اهداف دارویی پرورش دهند. شاهدانه در پاییز ۲۰۱۸ به صورت فدرال برای استفادهٔ تفریحی برای بزرگسالان ۱۸ سال بالاتر قانونی شد. تولید همپ در سطح فدرال تنظیم می‌شود در حالی که فروش آن در سطح استان تنظیم و نظارت میشود. در سال ۲۰۱۹، تخمین زده می‌شود که ۵۶ تأسیسات سرپوشیده برای رشد گیاه همپ استفاده میشدند که از این مقدار حدود ۲۰ درصد انبار و ۷۰ درصد گلخانه بودند. شکل ۳ تعداد تخمینی تأسیسات رشد همپ (کشت داخلی) را به تفکیک زیربخش در سال ۲۰۱۹ برای بریتیش کلمبیا نشان میدهد.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، حدود ۶/۳ میلیون فوت مربع فضای داخلی برای تولید حشیش در سال ۲۰۱۹ در بریتیش کلمبیا مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳. تعداد تأسیسات سرپوشیدهٔ همپ بر اساس زیربخش در سال ۲۰۱۹ برای بریتیش کلمبیا



شکل ۴. محیط زیر کشت (فوت مربع) تأسیسات سرپوشیدهٔ همپ در سال ۲۰۱۹ برای بریتیش کلمبیا

1. Health Canada

بار حرارتی مورد نیاز گلخانه

میزان گرمایش و سرمایش گلخانه یکی از جنبه‌های مهم نگهداری گلخانه است. در روزهای گرم تابستان، بیشتر گلخانهها برای کنترل دمای هوا به چند خنک‌کننده احتیاج دارند. از طرفی طی ماه‌های سرد، برای اینکه دمای گلخانه سرد نشود، گلخانه‌ها از وسایل گرمایشی استفاده می‌کنند. قبل از خرید هر گونه تجهیزات گرمایشی و سرمایشی، یک گلخانه‌دار باید از نزدیک فضای گلخانهٔ خود را بررسی کند و چند محاسبه انجام دهد. با این محاسبه‌ها و یک بررسی مختصر، این اطمینان حاصل می‌شود که وسایل گرمایشی و سرمایشی به میزان لازم برای فضای گلخانه فراهم شده و محاسبهٔ سیستم گرمایش و سرمایش گلخانه تحت کنترل است. یک گلخانه‌دار که قصد دارد گلخانهٔ خود را با یک وسیلهٔ گرمایشی کند، ابتدا باید ظرفیت سیستم گرمایشی را تعیین کند. بهترین راه برای تعیین این مسئله مشخص کردن مقدار Qth لازم برای گرم کردن گلخانه است. این کار با محاسبهٔ مساحت سطح و کف گلخانه انجام می‌شود (به بیان دیگر، دیوار و مساحت سطح سقف). درخور یادآوری است که مساحت سقف، به دلیل داشتن شیب، معادل مساحت کف نخواهد بود. در واقع مساحت سقف از اندازهٔ سطح کف بیشتر است. پس از تعیین اندازهٔ کل مربع در معرض سیستم گرمایش، تولیدکننده باید حداکثر دمای مورد نظر را در زمستان (دمایی که تولیدکننده می‌خواهد گلخانه در ماه‌های زمستان کار کند) و حداقل دما را در خارج از گلخانه تعیین کند.

بیشترین تلفات حرارتی در گلخانه توسط تلفات هدایتی و مقدار کمی تلفات همرفت و تشعشع رخ می‌دهد. این تلفات معمولاً به طور هم‌زمان از سطح گلخانه رخ می‌دهند. قسمت هدایتی اتلاف حرارت را می‌توان از معادلهٔ ۱ محاسبه کرد (بر حسب BTU/h)[1]:

$$Q_{con} = SA \times U \times TD \qquad (۱)$$

که در آن SA سطحی از گلخانه است که در معرض سرما قرار دارد. مقدار این سطح را با مشخص کردن سطح سقف، دیواره‌های جانبی و دیوارهای انتهایی می‌توان محاسبه کرد. فاکتور U نشان‌دهندهٔ ضریب انتقال حرارت کلی سطح است. مقدار معمولی آن برای گلخانه‌هایی با یک لایه شیشه، پلیکربنات یا پلی اتیلن ۱/۱۵ است. از ۰/۷ برای پلی‌دوبل و ۰/۶ برای پلی‌کربنات دوجداره یا اکریلیک استفاده می‌شود. TD اختلاف دما (حداکثر دمای داخل شب - دمای طراحی زمستان) است. دمای معمول داخل گلخانه طی شب معمولاً ۷۰ درجهٔ فارنهایت است، زیرا گرمای مورد نیاز را برای ذوب برف فراهم می‌کند.

منبع اصلی دیگر از اتلاف حرارت می‌تواند ناشی از نفوذ باشد (تبادل هوای گرم داخل با هوای بیرون). این تبادل از طریق شکاف‌های اطراف درها، دریچه‌ها و دریچه‌ها، شیشه‌های ترک‌خورده یا لغزنده و خروج هوا از دودکش اتفاق می‌افتد. این جزء اتلاف حرارت را می‌توان با معادلهٔ ۲ تخمین زد:

$$Q_{inf} = 0.02 \times V \times C \times TD \qquad (۲)$$

که در آن V نشان‌دهندهٔ حجم گلخانه است که با ضرب مساحت کف در ارتفاع متوسط و در نتیجه، فوت مکعب محاسبه می‌شود. C نشان‌دهندهٔ تعداد تغییرات هوا در ساعت است. از ۰/۵ تا ۱ دفعه برای یک گلخانهٔ جدید، ۱/۵ دفعه برای یک خانهٔ شیشه‌ای که به‌خوبی نگهداری می‌شود و ۲ تا ۳ دفعه برای یک گلخانهٔ ضعیف استفاده می‌شود. اگر گلخانه در منطقهٔ بادخیز واقع شده است، ۱۰ تا ۱۵ درصد به این مقادیر اضافه میشود.

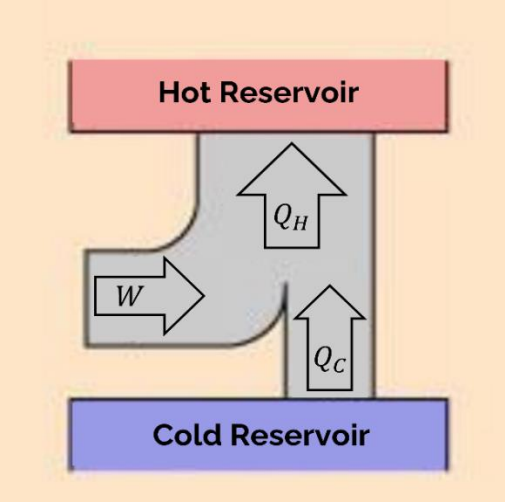
با اضافه کردن تلفات حرارتی هدایتی و نفوذی باهم، اتلاف حرارت کلی حاصل می‌شود. سیستم گرمایشی که انتخاب می‌شود باید دارای قدرت خروجی برابر یا بیشتر از کل تلفات حرارتی باشد. نصب دو واحد کوچک‌تر برای کارایی بیشتر و ایمنی در نظر گرفته می‌شود (رابطهٔ ۳).

$$Q_{total} = Q_{con} \times Q_{inf} \qquad (۳)$$

طراحی پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

برای فهم اساس کار پمپ حرارتی، نیاز به درک تئوری سیکلهای تبرید و محدودیت‌های آن‌ها است. در سال ۱۸۲۴ کارنو برای اولین‌بار، از سیکل ترمودینامیکی برای توصیف یک فرایند استفاده کرد؛ سیکلی که در نظر گرفت به عنوان معیاری برای کارایی پمپ حرارتی باقی ماند. می‌توان پمپ حرارتی را یک ماشین حرارتی معکوس در نظر گرفت. ماشین حرارتی، حرارت را از یک منبع با دمای بالا گرفته و به منبع با دمای پایین‌تر تحویل داده و در طول این عمل می‌تواند کار انجام دهد. یک پمپ حرارتی نیاز به یک کار ورودی برای گرفتن حرارت از یک منبع با دمای پایین و تحویل آن به یک منبع با دمای بالاتر دارد، که در شکل ۵ نشان داده شده است.

1. https://www.greenhousemag.com/article/technology-determining-greenhouse-heat-loss/



شکل ۵. مدل ترمودینامیکی پمپ حرارتی و ماشین حرارتی

می‌توان به‌سادگی نشان داد اگر این ماشین‌ها هر دو «معکوس‌پذیر» باشند، در این‌صورت یک حد محدود برای مقدار کارایی آن‌ها وجود خواهد داشت. برای ماشین حرارتی، Q_H/W نسبت مهمی بوده و بازده حرارتی نامیده می‌شود و برای پمپ حرارتی، می‌توان این نسبت را به صورت QH/W نوشت و آن را ضریب عملکرد یا COP واحد نامید، همچنین نسبت W/QH به عنوان $COP_{cooling}$ شناخته می‌شود تا از COP برای پمپ حرارتی متمایز شود. از آنجا که $Q_H=Q_L+W$ بنابراین $COP=COP_{cooling}+1$.

در سیکل ایدهآل کارنو حرارت به طور هم‌دما در دمای T_H داده شده و در دمای یکنواخت T_L گرفته می‌شود. کمپرسور و انبساط‌دهنده، به طور آیزنتروپیکی فرض شده و موازنهٔ کار مورد نیاز، توسط یک محرک خارجی تأمین می‌شود. با استفاده از تعریف آنتروپی و قوانین ترمودینامیک، می‌توان نشان داد ضریب عملکرد کارنو عبارت است از (رابطهٔ ۴):

$$CoP = \frac{T}{T_H - T_C} + 1 \qquad (۴)$$

هیچ نوع پمپ حرارتی ساخته‌شده نمی‌تواند عملکردی بهتر از سیکل کارنو داشته باشد. سیکل تراکم بخار در پمپ حرارتی از سیکل‌های مورد استفاده است که برای داشتن COP بالاتر به کار می‌رود.

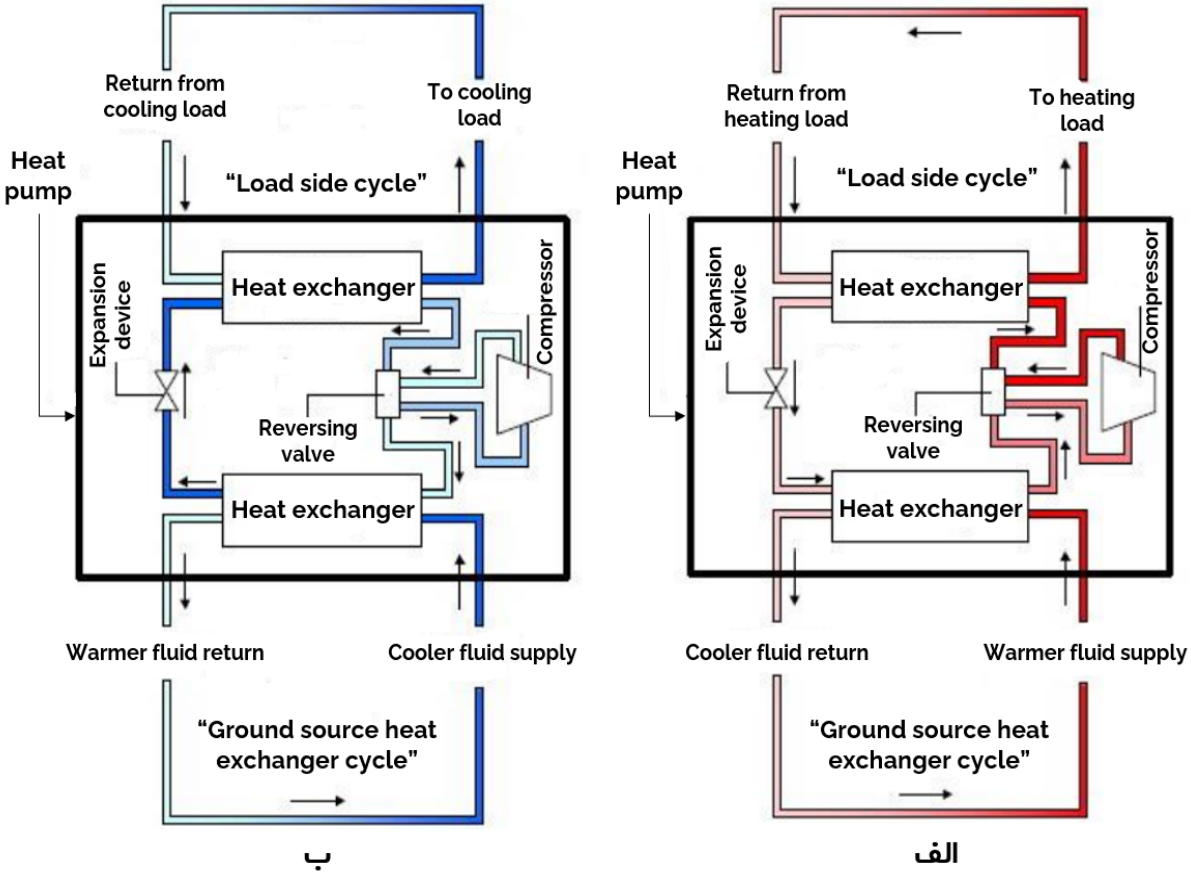
تراکم بخار یکی از روش‌های پمپ کردن حرارت به شمار می‌آید. روش‌های مختلفی برای پمپ کردن حرارت بین دو منبع حرارتی وجود دارد و همان‌طور که اشاره شد، سیکل تراکم بخار یکی از این روش‌هاست. سیکل‌های تبرید، جذبی، تراکم گازی و روش‌های ترموالکتریکی نیز برای این کار موجودند. تمام این روش‌ها در حالت کلی نیاز به یک ورودی انرژی مکانیکی، الکترونیکی یا گرمایی برای به کار انداختن آن‌ها دارند.

برای ضریب عملکرد می‌توان تعریف مناسبی ارائه کرد. نسبت انرژی در دستری (E) به انرژی ورودی کاری (Q) یک معیار سنجش کلی از کارایی یک پمپ حرارتی است. این نسبت با نام‌های مختلفی همچون ضریب عملکرد، ضریب حرارت‌دهی، بازده حرارتی، نسبت کارکرد و نسبت انرژی به کار می‌رود که COP یا ضریب عملکرد بیشتر رایج است. برای اینکه یک واحد حرارتی بتواند مفید واقع شود، باید ضریب عملکرد آن بالاتر از یک باشد و هرچه این مقدار بیشتر باشد، کارایی پمپ حرارتی بیشتر خواهد بود. برای ماشین‌های بزرگ که بین منابع حرارتی با اختلاف دمای پایین بین آن دو کار می‌کنند، ضریب عملکرد بین مقادیر ۵ یا ۶ قابل حصول است.

برای واحدهای کوچک که از هوای بیرون به عنوان منبع استفاده میکنند، ضریب عملکرد بین ۲ و ۳ حاصل می‌شود. وقتی واحد پمپ حرارتی در حالت سرمایش کار می‌کند و ترموستات در حالت سرمایش عمل می‌کند، حرارت از هوای درون ساختمان جذب می‌شود و با بخار کردن مجدد در کویل داخلی[1] این کار انجام می‌گیرد. لذا هوای درون خنک‌تر شده و رطوبت آن گرفته شده و توسط سیستم کانال‌کشی در فضای مورد نیاز پخش و توزیع

1. Indoor coil

می‌شود. سپس بخار مبرد خنک شده و به مایع تبدیل می‌شود، دوباره به کویل داخلی پمپ می‌شود و سیکل تکرار می‌شود. حالت گرمایش نیز شبیه به همین حالت اتفاق می‌افتد. شکل ۶ شماتیک کلی پمپ حرارتی در حالت سرمایشی و گرمایشی را نشان میدهد.



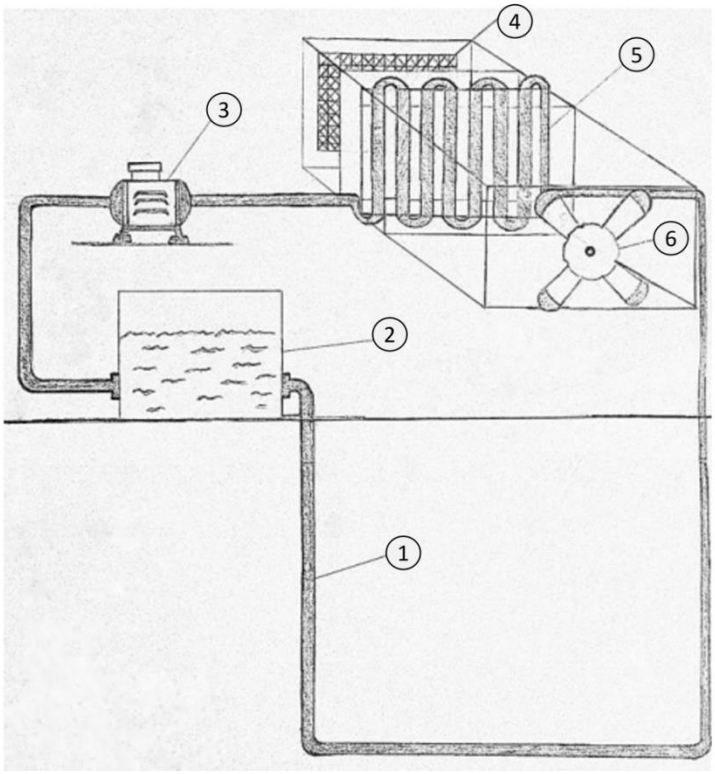
شکل ۶. پمپ حرارتی در حالت الف) گرمایشی و ب) سرمایشی

وقتی که واحد در حالت گرمایشی است، هوای خارج از کویل بیرون[1] عبور می‌کند و حرارت خود را به مبرد می‌دهد. در این حالت دمای هوا تا زیر دمای یخ زدن آب پایین می‌آید. هرچند دمای هوای بیرون ممکن است کمی بالاتر از این مقدار باشد، این کاهش دما (در حدود ۱۰ درجهٔ سانتی‌گراد) باعث می‌شود رطوب موجود در هوا یخ بزند و برفک روی سطح کویل خارجی تشکیل شود. این برفک یا یخزدگی سطحی شروع به انباشتگی می‌کند و وقتی کویل به مقدار کافی با یخ پوشانده شد، کارایی سیستم را کاهش خواهد داد. برای جلوگیری از این کار، روش‌های متفاوتی از سوی سازندگان پیشنهاد شده است. برخی سازندگان استفاده از هیترهای مقاومتی در کویل خارجی را جهت ذوب یخ پیشنهاد کرده‌اند، با این‌حال، متداول‌ترین روش، معکوس کردن جهت مبرد است. با برعکس کردن حالت دستگاه به حالت معکوس، یخ در کویل بیرونی ذوب می‌شود. برای بالا بردن این تأثیر، فن کمپرسور متوقف شده و در این دوره‌کاری خاموش می‌شود. با از بین رفتن برفک کنترل‌کنندهٔ دمای دفراست جهت جریان را بر عکس می‌کند و فاز گرمایش دوباره شروع میشود.

در این قسمت به طراحی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی مناسب برای تأمین انرژی گلخانه می‌پردازیم.

سیستم مورد نظر (شکل ۷) از قسمت‌های زیر تشکیل شده است: فیلتر هوا (۴)، مخزن آب (۲)، پمپ آب (۳)، کویل خنک‌کننده (۵)، فن AC (۶)، و لوله‌های HDPE (۱).

1. Out-door



شکل ۷. شماتیک کلی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی مورد طراحی

ابتدا آب ذخیره‌شده در داخل مخزن آب (۲) با استفاده از پمپ آب (۳) به بیرون پمپ می‌شود و به سیستم خنک‌کننده منتقل می‌شود و در آنجا از طریق حلقه‌های لولهٔ مسی (۵) داخل دستگاه خنک‌کننده جریان می‌یابد. واحد خنک‌کننده هوای گرم از محیط اطراف توسط واحد خنک‌کننده که شامل یک محفظهٔ خارجی، فیلترهای هوا (۴)، حلقه‌های لولهٔ مسی (۵)، و فن (۶) است، خارج یا مکیده می‌شود. حال هوای داغ مکیده‌شده گرمای خود را به صورت همرفتی به لولهٔ مسی می‌دهد، بنابراین هوای سرد از واحد خنک‌کننده خارج می‌شود و سپس لولهٔ مسی داغ گرمای خود را به آب سردی که در داخل آن جریان دارد به وسیلهٔ همرفت منتقل می‌کند. اکنون آب گرم از طریق لوله‌های HDPE (۱) از واحد خنک‌کننده به داخل زمین می‌ریزد. دمای ۴-۶ فوت زیر سطح زمین طی سال ثابت می‌ماند، زیرا زمین تقریباً نیمی از انرژی خورشیدی دریافتی را جذب می‌کند و در اعماق حتی بیشتر حدود ۳-۵ متر دما حتی کمتر است. در اعماق سطح زمین، شبکه‌ای از لوله‌های HDPE (۱) یا حلقه‌های زمینی خواهیم داشت که گرما را از آب داغ به زمین منتقل می‌کند و به عنوان یک هیت سینک عمل می‌کند و در نتیجه، آب دوباره سرد می‌شود یا دمای اولیه خود را به دست می‌آورد.

سپس آب سرد از طریق لولهٔ HDPE (۱) جریان می‌یابد و در مخزن آب (۲) جمع می‌شود و این چرخه به طور مداوم تکرار می‌شود و در نتیجه، محیط گلخانه خنک می‌شود. به طور مشابه در فصل زمستان زمین گرم‌تر است، بنابراین به عنوان یک بخاری عمل می‌کند. مشخصات هوا و آب ورودی و خروجی سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

انرژی گرمایشی/سرمایشی تحویلی پمپ حرارتی از طریق رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود:

$$Q_{gt} = Ma \times (h_2 - h_1) + (M_w \times h_w) \quad (۵)$$

که در آن (رابطهٔ ۶):

$$Ma = V^* / V_l \quad (۶)$$

و (رابطهٔ ۷):

$$M_w = Ma \times (W_1 - W_2) \quad (۷)$$

برای محاسبهٔ سطح کویل خنک‌کننده از فرمول ۸ برای محاسبهٔ گرمای جابه‌جایی اجباری استفاده می‌کنیم که مساحت سطح کویل را می‌دهد که برای بار خنک‌کننده مورد نیاز کویل باید با هوا در تماس باشد (رابطهٔ ۸).

$$Q = h \times A_s \times (T_s - T_\infty) \quad (۸)$$

که در آن Q بار خنک‌کننده یا گرمای تولیدشده است، h ضریب انتقال حرارت کلی بین هوا و آب هنگامی که مس به عنوان یک محیط عمل میکند، T_s دمای سطح A_s است، و T_∞ دمای آب است.

نتایج

تعیین ظرفیت سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

ظرفیت سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی با میزان بار حرارتی مورد نیاز گلخانه در شرایط طراحی برابر است. به بیانی، ظرفیت پمپ حرارتی به میزانی باید باشد که بار حرارتی مورد نیاز گلخانه در فصل سرد سال را تأمین کند. محاسبات بار حرارتی مورد نیاز گلخانه نشان می‌دهد ظرفیت پمپ حرارتی باید برابر ۵۷۰/۲ کیلووات باشد. به این صورت که برای تأمین دمای مناسب گلخانه‌ای به مساحت ۵ هکتار با ارتفاع ۵ متر و شرایط طراحی دیگر، پمپ حرارتی به ظرفیت ۵۷۰/۲ کیلووات مورد نیاز است. جدول ۴ نتایج مربوط به طراحی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات هوای ورودی و خروجی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

ویژگی	هوا داخل	خروجی هوا
نرخ جریان حجم هوا(V*)	۰/۰۵۶m^3/s	-
دمای هوا(T)	۲۱ C	۵ C
رطوبت نسبی(RH)	۵۰ %	۱۰۰ %
حجم مشخص(V_l)	۰/۹m^3/kg (dry air)	-
رطوبت خاص(W)	۰/۰۳۱	۰/۰۲۰
آنتالپی(h)	$h = (1.006 + T) + W[(1.84 + T) + 2501](kJ/kg)$	

جدول ۳. مشخصات آب ورودی و خروجی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی

شماره	پارامتر	ارزش	واحد
۱	نرخ جریان جرمی آب خنک‌کننده(M*)	۰,۲۳	kg/s
۲	دمای ورودی آب	۱۰	C
۳	ظرفیت حرارتی ویژهٔ آب (Cp)	۴/۲	kJ/kg.K
۴	آب خروجی دمای آب میعانات	۲۶	C
۵	آنتالپی ($h_w = h_f$ at 25ºC)	۱۰۴,۸۳	kJ/kg

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	تلفات حرارت هدایتی	۵۱۶/۴	کیلووات
۲	تلفات حرارت همرفتی	۵۳/۵	کیلووات
۳	تلفات حرارتی کلی	۵۷۰/۲	کیلووات
۴	سطح گلخانه در تماس با محیط	۵۶۰۰۰	مترمربع
۵	ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی	۵۷۰/۲	کیلووات
۶	نرخ هوای دمندهٔ هیت پمپ	۱۱/۵۷	مترمکعب بر ثانیه
۷	نرخ جریان آب هیت پمپ	۸/۴۸	کیلوگرم بر ثانیه

تأثیر کشت گیاه همپ در جذب کربن

تخمین‌های جذب کربن با بررسی محتوای کربن مولکول‌های تشکیل‌دهندهٔ الیاف ساقهٔ همپ محاسبه می‌شود. ساقه‌های همپ صنعتی عمدتاً از سلولز، همی سلولز و لیگنین به نسبت‌های زیر تشکیل شده‌اند:

- سلولز ۷۰ درصد وزن خشک ساقه را تشکیل می‌دهد. سلولز یک پلیمر خطی همگن است که از واحدهای گلوکز تکرارشونده ساخته شده است. محتوای کربن سلولز ۴۵ درصد از جرم مولکولی آن را تشکیل میدهد.

- همی‌سلولز ۲۲ درصد وزن خشک ساقه را تشکیل می‌دهد. همی‌سلولز پیوندی بین سلولز و لیگنین ایجاد می‌کند. دارای ساختار شاخه‌ای متشکل از انواع قندهای پنتوز با محتوای کربن ۴۸ درصد است.
- لیگنین ۶ درصد وزن خشک ساقه را تشکیل می‌دهد. لیگنین یک مادهٔ تقویت‌کننده است که معمولاً بین میکروفیبریل‌های سلولزی قرار دارد. مولکول لیگنین دارای ساختار پیچیده‌ای است که با کربنی که ۴۰ درصد جرم مولکولی را تشکیل میدهد، متغیر است.

نتیجه این است که هر تن زیست‌توده همپ صنعتی حاوی ۰/۴۴۵ تن کربن جذب‌شده از جو (۴۴/۴۶ درصد وزن خشک ساقه) است.

طبق IPCC۱۰، ۱۲ تن کربن معادل ۴۴ تن CO_2 است که معادل ۱/۶۳ تن جذب CO_2 به ازای هر تن زیست‌تودهٔ همپ برداشت شده است. بر اساس کاربری اراضی، با استفاده از میانگین عملکرد همپ ۵/۵ تا ۸ تن در هکتار، این نشاندهندهٔ ۸/۹ تا ۱۳/۴ تن CO_2 جذب‌شده در هر هکتار کشت همپ است.

برای تخمین، رقم متوسط ۱۰ تن در هکتار جذب CO_2در این مطالعه استفاده شده است، رقمی که به نظر یک تخمین نسبتاً محافظه کارانه است.

ریشه‌ها و مالچ برگ (بدون احتساب مواد ریشهٔ فیبری سخت برای اندازه‌گیری) باقی‌مانده در محل تقریباً ۲۰ درصد از جرم مواد برداشت‌شده را در آزمایش‌های مزرعه‌ای اولیه نشان می‌دهد. محتوای کربن جذب‌شده و باقی‌مانده در خاک، ۰/۰۸۴ تن در هر تن مادهٔ برداشت‌شده تخمین زده می‌شود. (۴۲ درصد وزنی).

برآورد عملکرد ۵/۵ تا ۸ تن زیست‌توده در هکتار که نشاندهندهٔ ۰/۴۶ تا ۰/۶۷ تن کربن جذب‌شده در هکتار یا ۱/۶۷ تا ۲/۴۶ تن در هکتار CO_2 است که پس از کشت همپ در محل باقی میماند. با در نظر گرفتن ۱۶ درصد رطوبت اتمسفر با وزن خشک، تخمین نهایی جذب CO_2 به شرح زیر است:

- ✓ CO_2 جذب‌شده در هر تن ساقهٔ همپ معادل ۱/۳۷ تن
- ✓ CO_2 جذب در هکتار (ساقه) معادل ۷/۴۷ تا ۱۱/۲۵ تن
- ✓ CO_2 جذب‌شده در هکتار (ریشه و برگ) معادل ۱/۴۰ تا ۲/۰۶ تن

با در نظر گرفتن ۲ بار کشت گیاه همپ صنعتی در هر سال، معادل ۱۷/۷۴ تا ۲۶/۶۲ تن کربن‌دی‌اکسید در هر هکتار ذخیره می‌شود. با توجه به ۴ هکتار زیر کشت محصول در گلخانهٔ طراحی‌شده، رقمی معادل ۷۰/۹۶ تا ۱۰۶/۴۸ تن در سال کربن‌دی‌اکسید در نتیجه کشت گیاه همپ در گلخانهٔ مورد نظر ذخیره می‌شود.

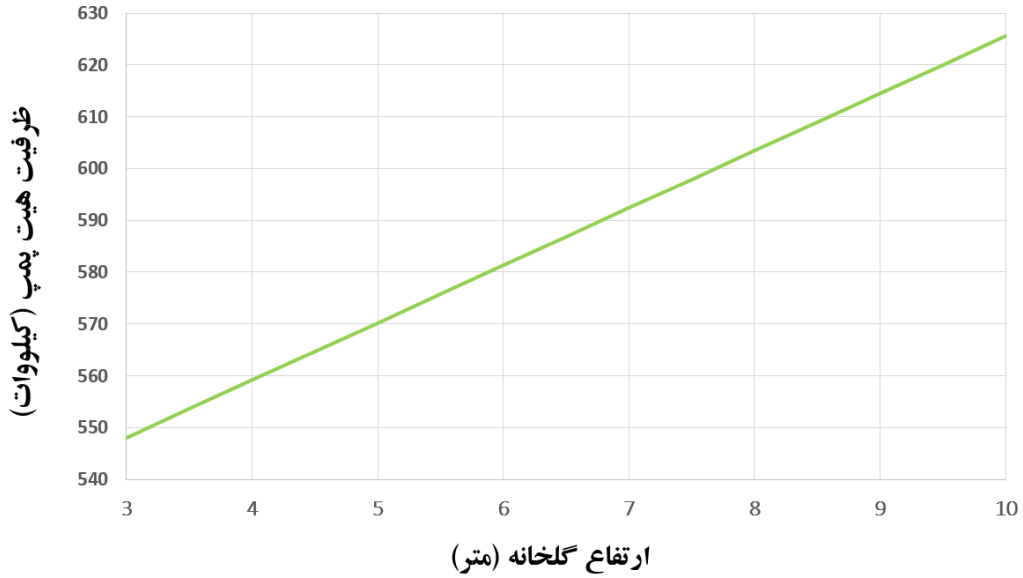
با توجه به مصرف برق ۱۲/۴۵ کیلووات ساعت بر هر متر مربع زیر کشت گلخانه برای رشد گیاه همپ، مصرف انرژی کل گلخانه مورد نظر معادل ۴۹۸ مگاوات ساعت است. اثرات انتشار کربن‌دی‌اکسید برای تأمین چنین برقی در حالتی که برق از نیروگاههای حرارتی با راندمان ۴۰ درصد تأمین شود، معادل ۶/۴۴ تن معادل کربن‌دی‌اکسید است که با وجود به‌کارگیری سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، از انتشار این مقدار آلاینده نیز جلوگیری به عمل می‌آید. به بیانی، استفاده از سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی به منظور تولید گیاه همپ صنعتی، یک سیستم با عملکرد کربن مفنی ایجاد می‌کند و گیاه همپ را به عنوان یکی از محصولات مهم جهت کربن‌زدایی از جو زمین قرار میدهد.

تأثیر ارتفاع گلخانه در ظرفیت پمپ حرارتی

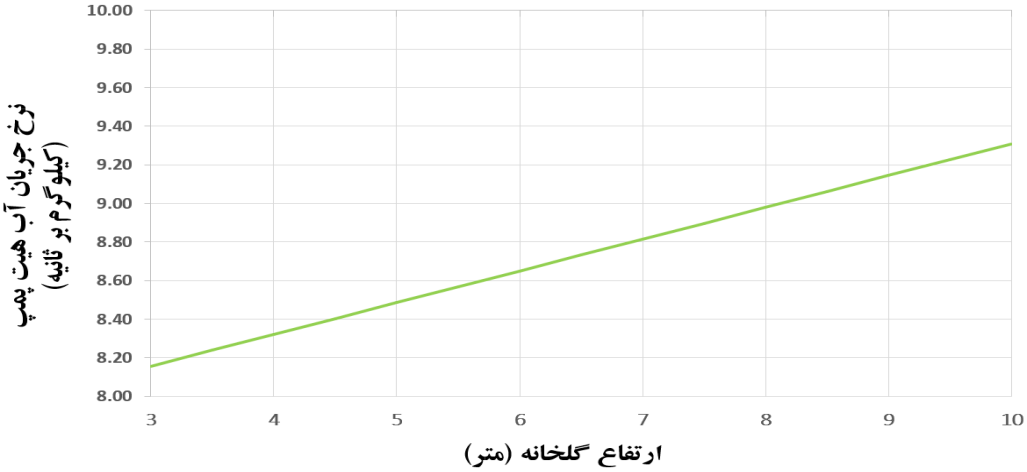
شکل ۸ تأثیر افزایش ارتفاع گلخانه در میزان بار حرارتی مورد نیاز آن و در نتیجه، ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، با افزایش ارتفاع گلخانه، بار حرارتی مورد نیاز گلخانه نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان ظرفیت پمپ حرارتی را نیز افزایش می‌دهد، به طوری که با افزایش ارتفاع از ۳ متر تا ۱۰ متر، ظرفیت پمپ حرارتی از ۵۴۸ تا ۶۲۵ کیلووات افزایش پیدا می‌کند.

تأثیر ارتفاع گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی

شکل ۹ تأثیر افزایش ارتفاع گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، با افزایش ارتفاع گلخانه، نرخ جریان آب پمپ حرارتی نیز افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش ارتفاع از ۳ متر تا ۱۰ متر، نرخ جریان آب پمپ حرارتی از ۸/۱ تا ۹/۳ کیلوگرم بر ثانیه افزایش پیدا میکند.



شکل ۸. تأثیر ارتفاع گلخانه در ظرفیت هیت پمپ



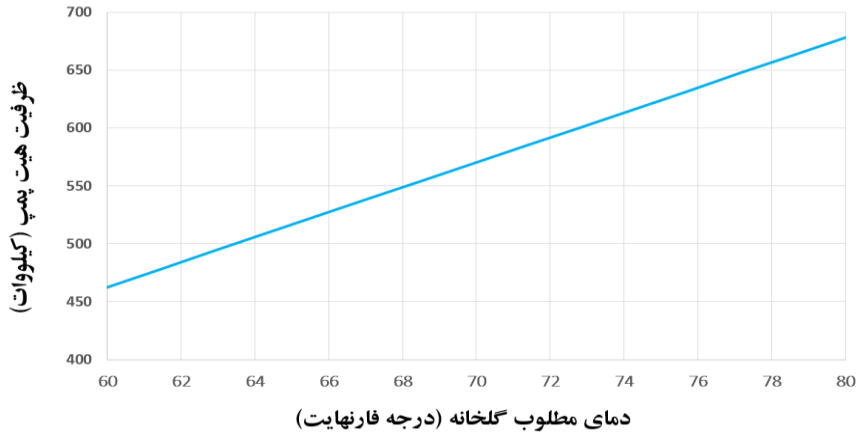
شکل ۹. تأثیر ارتفاع گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی

تأثیر دمای مطلوب گلخانه در ظرفیت پمپ حرارتی

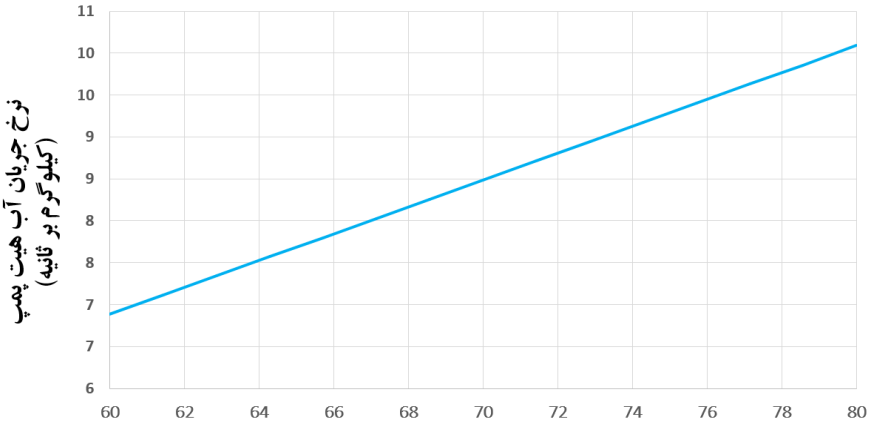
شکل ۱۰ تأثیر افزایش دمای مطلوب گلخانه در میزان بار حرارتی مورد نیاز آن و در نتیجه، ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰، با افزایش دمای مطلوب گلخانه، بار حرارتی مورد نیاز گلخانه نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان ظرفیت پمپ حرارتی را نیز افزایش می‌دهد، به طوری که با افزایش دمای مطلوب از ۶۰ تا ۸۰ درجهٔ فارنهایت، ظرفیت پمپ حرارتی از ۴۶۲ تا ۶۷۷ کیلووات افزایش پیدا می‌کند.

تأثیر دمای مطلوب گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی

شکل ۱۱ تأثیر افزایش دمای مطلوب گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱، با افزایش دمای مطلوب گلخانه، نرخ جریان آب پمپ حرارتی نیز افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش دمای مطلوب از ۶۰ تا ۸۰ درجهٔ فارنهایت، نرخ جریان آب پمپ حرارتی از ۶/۸ تا ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰. تأثیر دمای مطلوب گلخانه در ظرفیت پمپ حرارتی



شکل ۱۱. تأثیر دمای مطلوب گلخانه در نرخ جریان آب پمپ حرارتی

نتیجه‌گیری

به عنوان یک محصول، گیاه همپ سازگار با محیط زیست بوده و در مقایسه با درختان و سایر گیاهان به‌سرعت رشد میکند و بنابراین، از مراحل اولیهٔ شروع به جذب CO2 می‌کند. همپ صنعتی به نگهداری محدودی نیاز دارد و به دلیل ویژگی‌های ریشه‌زایی عمیق، کربن خاک را هنگام پرورش احیا افزایش می‌دهد. با توجه به پتانسیل بالای کشت همپ در جذب کربن، در این مطالعه طراحی گلخانه پرورش گیاه همپ را انجام شد. برای جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی، از انرژی زمین‌گرمایی برای تأمین انرژی گلخانه استفاده کرده و به همین منظور طراحی سیستم پمپ حرارتی زمین‌گرمایی انجام شد. نتایج نشان داد با در نظر گرفتن ۲ بار کشت گیاه همپ صنعتی در هر سال، معادل ۱۷/۷۴ تا ۲۶/۶۲ تن کربن‌دی‌اکسید در هر هکتار ذخیره می‌شود. با توجه به ۴ هکتار زیر کشت محصول در گلخانه طراحی شده، رقمی معادل ۷۰/۹۶ تا ۱۰۶/۴۸ تن در سال کربن‌دی‌اکسید در نتیجه کشت گیاه همپ در گلخانهٔ مورد نظر ذخیره می‌شود. همچنین، ظرفیت پمپ حرارتی زمین‌گرمایی برای تأمین انرژی گلخانه برابر با ۵۷۰/۲ کیلووات است که این مقدار وابسته به ارتفاع و دمای مطلوب گلخانه است و با افزایش این پارامترهای طراحی، ظرفیت مورد نیاز پمپ حرارتی نیز افزایش پیدا می‌کند.

منابع

[1]. I. Trancoso et al., “Cannabis sativa L.: Crop management and abiotic factors that affect phytocannabinoid production,” Agronomy, vol. 12, no. 7, p. 1492, 2022.

[2]. H. Chen et al., “Effects of Different Growth Hormones on Rooting and Endogenous Hormone Content of Two Morus alba L. Cuttings,” Horticulturae, vol. 9, no. 5, p. 552, 2023.

[3]. A. Ahrens, D. Llewellyn, and Y. Zheng, “Is Twelve Hours Really the Optimum Photoperiod for Promoting Flowering in Indoor-Grown Cultivars of Cannabis sativa?,” Plants, vol. 12, no. 14, p. 2605, 2023.

[4]. T. Martins, A. C. Barreto, F. M. Souza, and A. M. Souza, “Fossil fuels consumption and carbon dioxide emissions in G7 countries: Empirical evidence from ARDL bounds testing approach,” Environ. Pollut., vol. 291, p. 118093, 2021.

[5]. P. L. Show, M. S. Y. Tang, D. Nagarajan, T. C. Ling, C.-W. Ooi, and J.-S. Chang, “A holistic approach to managing microalgae for biofuel applications,” Int. J. Mol. Sci., vol. 18, no. 1, p. 215, 2017.

[6]. J. Visković et al., “Industrial hemp (Cannabis sativa L.) agronomy and utilization: a review,” Agronomy, vol. 13, no. 3, p. 931, 2023.

[7]. A. Dashti and M. Gholami Korzani, “Study of geothermal energy potential as a green source of energy with a look at energy consumption in Iran,” Geotherm. Energy, vol. 9, no. 1, p. 28, 2021.

[8]. K. J. Lomas and R. Giridharan, “Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards,” Build. Environ., vol. 55, pp. 57–72, 2012.

[9]. S. Sanaye and B. Niroomand, “Thermal-economic modeling and optimization of vertical ground-coupled heat pump,” Energy Convers. Manag., vol. 50, no. 4, pp. 1136–1147, 2009.

[10]. H. Esen, M. Inalli, and M. Esen, “Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey,” Energy Convers. Manag., vol. 47, no. 9–10, pp. 1281–1297, 2006.

[11]. D. Romanov and B. Leiss, “Geothermal energy at different depths for district heating and cooling of existing and future building stock,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 167, p. 112727, 2022.

[12]. L. I. Lubis, M. Kanoglu, I. Dincer, and M. A. Rosen, “Thermodynamic analysis of a hybrid geothermal heat pump system,” Geothermics, vol. 40, no. 3, pp. 233–238, 2011.

[13]. P. J. Petit and J. P. Meyer, “Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air-source air conditioners in South Africa,” Energy, vol. 23, no. 2, pp. 137–143, 1998.

[14]. U. Çakır, K. Çomaklı, Ö. Çomaklı, and S. Karslı, “An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air,” Energy, vol. 58, pp. 210–219, 2013.

[15]. M. H. Ali, K. Kariya, and A. Miyara, “Performance analysis of slinky horizontal ground heat exchangers for a ground source heat pump system,” Resources, vol. 6, no. 4, p. 56, 2017.

[16]. S.-K. Kim and Y. Lee, “Evaluation of ground temperature changes by the operation of the geothermal heat pump system and climate change in Korea,” Water, vol. 12, no. 10, p. 2931, 2020.

[17]. G. Crini, E. Lichtfouse, G. Chanet, and N. Morin-Crini, “Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: A review,” Environ. Chem. Lett., vol. 18, no. 5, pp. 1451–1476, 2020.