

**Research paper****Location surveying using Root-Zone and linear Fresnel systems in greenhouses****M. Karimi¹, A. Maleki^{2*} and Sh. Besharati³**

1- M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Associated Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Article information**Extended Abstract**

Received: 2023/08/15

Accepted: 2024/12/30

Keywords: Root Zone system, Solar energy, Greenhouse, Linear Fresnel Collector.

*Corresponding author:

maleki@sku.ac.ir

ORCID: 

0000-0002-6773-4346

***Introduction***

Root temperature is a crucial ecological factor that influences plant growth. Low soil temperature near the root not only directly affects the functions of hormone absorption and metabolism in the root, but also impacts the photosynthesis and respiration of plants, resulting in slow crop growth and low yields. Therefore, maintaining the optimal temperature is crucial for enhancing crop growth. Root-Zone system technology is a way to reduce energy consumption and increase plant productivity. Typically, this system heats the soil bed using non-renewable energy. Solar water heating is a highly effective technology that can significantly reduce fossil fuel consumption and carbon dioxide emissions. Considering the shortage of non-renewable energy sources, the production of pollutants, and the high cost of this source, as well as the advantages of using the Root-zone system in a greenhouse, this research aims to investigate a greenhouse solar heating system equipped with a linear Fresnel concentrator, an auxiliary source, and a heat storage tank in Shahrekord. Equipping the Root-zone system with a linear Fresnel collector, in addition to reducing fossil energy consumption, increases agricultural production. It should be noted that the linear Fresnel has better solar energy absorption than other solar collectors, allowing it to heat water up to 100 degrees.

Method

A combined solar heating system for a greenhouse was theoretically investigated in Shahrekord (32 degrees latitude and 51 degrees longitude). The system in question features a linear Fresnel concentrator that supplies the heat necessary to raise the roots to a temperature of 26 degrees during the day. In this system, a tank for heat storage, a linear Fresnel collector (a heat generation unit), and a pump are utilized to heat the plant roots. The hot fluid inside the linear Fresnel collector is forcibly moved using a pump. Hot water pipes are placed on the bed with uniform heat distribution, and after heating the roots of the plants, they return to the tank and are placed on the collector path, where they are heated again and placed on the path. On cloudy and winter days, the auxiliary heat source heats the tank water to prevent a possible drop in temperature.

Results

In designing the Root-zone system, an attempt is made to ensure that the lowest temperature required for the roots to reach the desired temperature is achieved. Some researchers have sought the ideal root temperature for other crops. In general, most growers have found that an average temperature of 26 degrees Celsius in the rooting medium is the optimal condition. The heat required by the Root-zone system is affected by parameters such as the number of pipes under the root (N) and the area of each section (A). In the first stage, the area (A) and diameter (d) of the system pipes are examined, along with their effect on the required heat and temperature. In the second stage, based on the heat required by the system, the number of linear Fresnel glasses is examined in Shahrekord according to the radiation angle.

- The area change should be made according to W and N to meet the plant's needs. For seed germination or other processes that require high temperatures, the distance between the tubes should be reduced to prevent uneven seedling growth.
- As the diameter increases, the amount of heat required by the system increases. As the diameter of the Root-zone pipes increases, the amount of temperature and heat required to bring the root to the desired temperature increases. According to Newton's Law of Cooling, as the diameter of the pipe increases, the amount of heat required to reach the desired surface temperature increases.
- To minimize heat loss from the Pagrama pipes, we will insulate them with 3 cm thick rock wool.
- Temperature and solar radiation are key factors in determining the number of solar panels and the heat supply. Based on this value, the thermal efficiency and the amount of radiant energy per square meter of collector were calculated.
- To provide the necessary heat for a 100 m greenhouse, 5898.07 mJ of heat is required. Results show that the total mirror field area for December, the coldest month of the year, is 32 m². The Fresnel reflector in question has 29 rows of mirrors, $3 \times 0.36\text{m}$. Results show the required mirror field area for 12 months in Shahrekord. By combining the heating system, i.e. the solar collector and the auxiliary source, the number of solar panels installed can be reduced.

Conclusions

The results of the analyses performed are as follows:

- As the area of each section increases, the required temperature for it increases.
- As the diameter of the fluid-carrying pipes under the soil bed increases, the required temperature for the Root-zone system increases. The increase in diameter should be made according to the increase in fluid velocity in the pipe.
- This system requires an auxiliary source to prevent pressure drop on cold nights and days.

- Most greenhouse owners were dissatisfied with the high energy consumption and production of pollutants by the Root-Zone system. With the necessary studies and installation of solar collectors, the cost of energy consumption and production of pollutants can be minimized.
- The developed model, with the obtained results, is applicable to various linear Fresnel reflectors. This model can be used for fast and accurate evaluation of linear Fresnel reflectors. Additionally, it can be used for optimization by utilizing the initial relations as optimization variables.
- The system has an average thermal efficiency of 56 percent, which is a suitable value and competitive with other similar technologies. While the construction and maintenance costs are much lower than those of competitors.

Author Contributions

M. Karimi: Investigation, Data Curation, Writing – Original Draft.

A. Maleki: Methodology, Supervision, Writing – Review & Editing.

Sh. Besharati: Review & Editing.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Acknowledgements

The authors thank Shahrekord University for providing laboratory facilities and technical support.

Ethical Considerations

The authors have observed ethical principles in the preparation and publication of this scientific work, and this is confirmed by all of them.

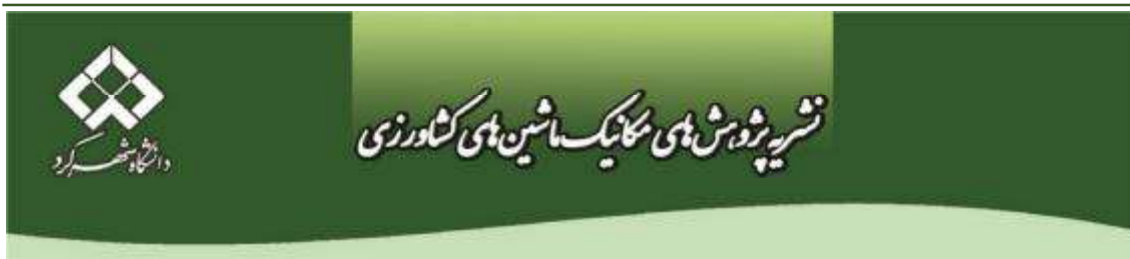
How to cite this paper:

Karimi, M., Maleki, A., and Besharati, Sh. (2025). Location surveying using Root-Zone and linear Fresnel systems in greenhouses, Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 34: 121-134. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14492.672>



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by [Shahrekord University](#). This article is an open-access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)



مقاله پژوهشی

امکان‌سنجی استفاده از سامانه پاگرما و فرنل خطی در گلخانه‌ها

مژگان کریمی^۱، علی ملکی^{۲*} و شاهین بشارتی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

۳- مربی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

گرم کردن ریشه گیاه می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت و رشد محصول و همچنین در کاهش مصرف سوخت در گلخانه اثر بگذارد. از این رو، یکی از مهم‌ترین نیاز گلخانه‌ها در فصل سرد، سامانه تأمین حرارت است. در تحقیق حاضر، یک سامانه‌ی ترکیبی پاگرما به کمک گرمایش خورشیدی برای گلخانه به صورت نظری در شهرکرد (مدار ۳۲ درجه عرض جغرافیایی و ۵۱ درجه طول جغرافیایی) بررسی شد. سامانه مورد نظر دارای یک متمرکز کننده‌ی فرنل خطی است که در طول روز، گرمای مورد نیاز برای رساندن دمای ریشه گیاه به ۲۶ درجه را تأمین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات قطر، گام لوله‌ها و مساحت هر بخش بر میزان گرمای تأمین‌ی از جمع‌کننده مؤثر است. به عبارتی با افزایش قطر لوله‌ها از ۶ به ۹ میلی‌متر و گام لوله‌ها از ۰/۲ متر به ۰/۳ متر، گرمای مورد نیاز سامانه افزایش می‌یابد. همچنین کل مساحت میدان صفحات بازتابنده برای دی ماه که سردترین ماه سال است، ۳۲ مترمربع است.

واژه‌های کلیدی: سامانه پاگرما، انرژی خورشیدی، گلخانه، جمع‌کننده فرنل خطی.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
maleki@sku.ac.ir

ORCID: 
0000-0002-6773-4346



مقدمه

دمای ریشه گیاه یک عامل بوم‌شناسی مهم است که بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارد (Yu et al., 2022). دمای پایین هوای داخل گلخانه و دمای پایین خاک، مانع از رشد محصولات به خصوص در فصل زمستان می‌شود، زیرا که میزان رشد محصول را تعیین می‌کند (Cai et al., 2022). دمای پایین خاک در نزدیکی ریشه گیاه نه تنها مستقیماً بر عملکردهای جذب و سوخت و ساز هورمون ریشه گیاه تأثیر می‌گذارد، بلکه بر فتوسنتز و تنفس گیاهان نیز تأثیر می‌گذارد و در نتیجه رشد محصول آهسته و عملکرد کم می‌شود، پس برای بهبود رشد محصول، حفظ دمای مناسب آن مهم است (Wang et al., 2021). مواد تغییر حالت دهنده (PCM)^۱ موادی با دمای ذوب بالا و دمای ذوب و انجماد خاص هستند و می‌توانند برای ذخیره و آزادسازی مقادیر زیادی انرژی حرارتی استفاده شوند. مواد تغییر حالت دهنده را می‌توان برای ذخیره انرژی خورشیدی در روز و رهاسازی آن در شب استفاده کرد. کاربردهای مواد تغییر حالت دهنده به دلیل ظرفیت آن برای افزایش بهره‌وری انرژی سامانه‌ها و کاهش وابستگی آن‌ها به منابع تجدید ناپذیر بسیار مورد توجه است. تعداد کمی از برنامه‌های مواد تغییر حالت دهنده برای بهبود سامانه‌های گرمایش گلخانه طراحی شده‌اند (Kooli et al., 2015). سامانه‌های گرمایش ریشه گیاه می‌توانند برای محصولات بدون خاک با بسترهای پرلیت ترکیب و با استفاده از آب و کود، عملکرد تولید را به میزان قابل توجهی افزایش دهند (Llorach-Massana et al., 2016).

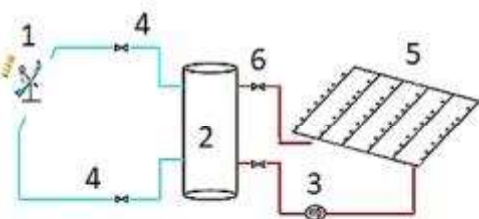
در زمان حاضر، پیشرفت اقتصادی هر کشور به مصرف انرژی بستگی دارد. در درجه اول، انرژی از طریق سوزاندن سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود که منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Anand et al., 2020). پیامدهای معکوس گرمایش جهانی در سراسر جهان مشاهده می‌شود. پیش‌بینی می‌شود در صورت ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای، دمای سطح بین سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۲ به میزان ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش یابد (T. Stocker et al., 2013). تنها راه ممکن، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با فناوری‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر است. انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی استفاده‌ی بیش‌تری در صنعت دارند زیرا که

قابلیت زیادی برای ادغام در گلخانه‌های کشاورزی دارند (Gorjian et al., 2021). همچنین، این منبع تقریباً در تمام نقاط جهان به طور گسترده در دسترس است. تا امروزه، توسعه زیادی در سامانه‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی انجام شده است و سامانه‌های گرمایش آب مبتنی بر انرژی خورشیدی در سطح پیشرفته‌تری در بازار ارائه می‌شوند (Chopra et al., 2020).

فناوری خورشیدی جایگزین مناسبی است که می‌تواند به جای منابع انرژی معمولی استفاده شود (Naveen et al., 2023). سامانه‌های حرارتی انرژی خورشیدی به تنهایی قادر به تأمین گرما برای ذخیره‌سازی در حجم زیاد هستند (Esen & Yuksel, 2013). مشخص شده است که فناوری بازتابنده فرنل خطی^۲ در مقایسه با جمع‌کننده‌های سهمی دارای مزایای قابل توجهی است، به طوریکه هزینه اجزای سامانه که با توجه به شکل مسطح صفحات بازتابنده در بازتابنده فرنل خطی کمتر است (Boito & Grena, 2016). جمع‌کننده فرنل دارای وزن کم است که باعث می‌شود هزینه ساخت نسبتاً کم باشد. به صورت موردی مزایای استفاده از سامانه فرنل خطی شامل هزینه‌های تعمیرات و نگهداری پایین و عدم آسیب‌پذیری در مقابل باد و افزایش ردیف‌های صفحات بازتابنده به منظور دستیابی به دماهای بالاتر و هزینه نصب پایین‌تر است (Bellos et al., 2016; Hongn & Nixon & Davies, 2012; Larsen, 2018).

فناوری سامانه‌ی پاکرما یک راه برای کاهش میزان انرژی مصرفی و افزایش باروری گیاهان است. به طور معمول این سامانه با استفاده از انرژی‌های تجدیدناپذیر، بستر خاک را گرم می‌کند (Chopra et al., 2023). گرمایش آب مبتنی بر انرژی خورشیدی یک فناوری بسیار خوب است که می‌تواند مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش دهد (Chopra et al., 2020). در سال ۲۰۲۰ بیان شد گلخانه‌ها باید از جمع‌کننده‌های خورشیدی برای ذخیره انرژی حاصل از خورشید استفاده کنند تا آن را در طول شب آزاد کنند. گلخانه‌های خورشیدی به دلیل هزینه‌های جاری پایین و قابلیت صرفه‌جویی در انرژی، به طور فزاینده‌ای محبوبیت دارند و به طور مثال به صورت گسترده در روستاهای شمالی چین مورد استفاده قرار می‌گیرند (Yu et al., 2020).

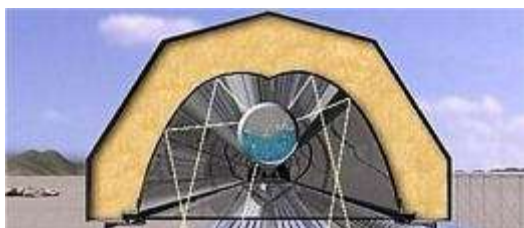
کلی، بیش‌تر کشاورزان میانگین دمایی ۲۶ درجه سلسیوس را در بستر ریشه گیاه‌زایی حالت بهینه معرفی کرده‌اند (Llorach-Massana *et al.*, 2016).



شکل ۱- اجزاء سامانه‌ی پاگرما، ۱- جمع‌کننده فرنل خطی، ۲- مخزن ذخیره گرما، ۳- پمپ آب گرم، ۴- مسیر آب گرم، ۵- سامانه حرارتی در زیر ریشه گیاه و ۶- مسیر آب برگشتی

جمع‌کننده فرنل خطی

بازتابنده متمرکز خورشیدی دستگاه‌هایی هستند که به منظور تمرکز تابش پرتوی مستقیم در ناحیه جاذب از یک متمرکز کننده استفاده می‌کنند (شکل ۲). بنابراین، می‌توان دمای بالایی را به دست آورد، زیرا مقادیر شار گرما در ناحیه جاذب زیاد و تلفات حرارتی به دلیل ناحیه جاذب کوچک محدود است (Bao *et al.*, 2013). بازتابنده فرنل خطی شامل بازتابنده‌های اولیه صاف یا تقریباً مسطح و یک دریافت‌کننده گرما است. بازتابنده‌های اولیه، خورشید را در طول روز ردیابی می‌کنند و پرتوهای خورشید را منعکس می‌کنند، این انرژی جذب شده به سیال عامل که از آن عبور می‌کند، منتقل می‌شود (Qiu *et al.*, 2015). برای تحلیل حرارتی سامانه از مدل نمایش داده شده در شکل ۲ استفاده شد.



شکل ۲- تصویر متمرکز کننده فرنل

مساحت مؤثر صفحات بازتابنده اولیه (A_a) بر حسب (m^2) با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود. این ویژگی با فرض این‌که صفحات بازتابنده اولیه در جهت افقی هستند مساحت مؤثر بازتابنده‌های اولیه را برآورد می‌کند (Qiu *et al.*, 2015):

بیشتر منابع موجود بر روی مواد تغییر حالت دهنده‌ها تمرکز کرده‌اند اما مواد تغییر حالت دهنده‌ها علاوه بر اینکه گران هستند، طول عمر کوتاهی دارند و در بازار نیز به سختی یافت می‌شوند. اما کانال‌های حرارتی همچون لوله‌ها در اندازه‌های مختلف در بازار به راحتی یافت می‌شوند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند، به طوری که کشاورز به راحتی می‌تواند با هزینه‌ی کم‌تر، گلخانه را به سامانه‌ی پاگرما مجهز نماید. همچنین با توجه به کمبود منابع انرژی‌های تجدید ناپذیر و تولید آلاینده‌ها و گران بودن این منبع و همچنین مزایای استفاده از سامانه‌ی پاگرما در گلخانه، هدف این تحقیق بررسی یک سامانه‌ی گرمایشی خورشیدی گلخانه مجهز به متمرکز کننده‌ی فرنل خطی، منبع کمکی و یک مخزن ذخیره‌ی حرارت، در شهرکرد است. مجهز نمودن سامانه‌ی پاگرما به جمع‌کننده فرنل خطی، علاوه بر کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی، تولید محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است فرنل خطی، جذب انرژی خورشید بهتری نسبت به بقیه جمع‌کننده‌های خورشیدی دارد به طوری که می‌تواند آب را تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس گرم نماید (Boito & Grena, 2016).

مواد و روش‌ها

در این سامانه از یک مخزن آب برای ذخیره حرارت، جمع‌کننده فرنل خطی (واحد تولید حرارت) و پمپ برای انتقال آب و گرم کردن ریشه گیاهان استفاده می‌شود (شکل ۱). سیال گرم در داخل جمع‌کننده فرنل خطی به صورت اجباری و با استفاده از پمپ مذکور به حرکت در می‌آید. لوله‌های آب گرم با توزیع یکسان گرما بر بستر خاک قرار گرفته و پس از گرما دهی به ریشه گیاه‌ی گیاهان به مخزن برگشته و در مسیر جمع‌کننده قرار گرفته، مجدداً گرم شده و در مدار مورد اشاره قرار می‌گیرد. در روزهای ابری و زمستانی منبع حرارتی کمکی، آب مخزن را گرم می‌کند تا از افت احتمالی دما جلوگیری کند. در ادامه روابط مورد نیاز جهت طراحی و بهینه‌سازی این سامانه، بیان خواهد شد.

در طراحی سامانه‌ی پاگرما سعی می‌شود که کمترین انرژی گرمایی برای رسیدن ریشه گیاه به دمای مطلوب نیاز باشد. برخی از پژوهش‌گران به دنبال دمای ایده‌آل ریشه گیاه برای سایر محصولات بوده‌اند. به طور

لوله‌های حامل آب گرم (پاگرما)

لوله‌کشی سامانه‌ی پاگرما برای داشتن بیش‌ترین بازدهی به عواملی هم‌چون قطر و اندازه‌ی لوله‌های حامل سیال، تعداد مسیرهای رفت و برگشتی، دمای اولیه‌ی سیال، گام لوله‌ها و هدایت حرارتی خاک که وابسته به جنس خاک و میزان رطوبت آن است بستگی دارد. برای به دست آوردن نرخ انتقال گرما در لوله‌های حامل انرژی سه نوع انتقال حرارت وجود دارد: انتقال حرارت هدایتی که در لوله‌ی پلی‌اتیلن و در خاک صورت می‌گیرد و انتقال حرارت جابجایی که در داخل لوله به واسطه‌ی آب جریان و به صورت معادله (۷) است (قانون سرمایش نیوتن):

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (۷)$$

که در این معادله، (h) ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب برحسب $(W/m^2.K)$ ، (A) سطح تماس جداره لوله با آب جاری بر حسب (m^2) ، (T_s) دمای جدار لوله و (T_f) دمای میانگین آب جاری در لوله بر حسب درجه سلسیوس است. انتقال حرارت هدایتی در خارج از لوله که توسط خاک صورت خواهد گرفت (قانون فوریه):

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (۸)$$

در معادله (۸)، $(\frac{dT}{dx})$ گرادیان دما در جهت (x) برحسب درجه سلسیوس بر متر، (k) ضریب انتقال حرارت هدایتی بر حسب $(W/m.K)$ و (A) سطح مقطع بر حسب (m^2) است. نرخ انتقال حرارت هدایتی یک بعدی در شرایط دائم در راستای شعاعی استوانه و با مشخص بودن دماهای سطح داخل و خارجی لوله به صورت معادله (۹) در نظر گرفته شده است:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dx} = (2\pi r L) \frac{dT}{dr} = \frac{2\pi L k (T_1 - T_2)}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \quad (۹)$$

در معادله (۹)، (r_2) شعاع خارجی و (r_1) شعاع داخلی بر حسب (m)، (k) ضریب انتقال حرارت هدایتی برای ماده‌ی لوله، (L) طول لوله بر حسب (m)، (T_2) دمای سطح بیرون لوله و (T_1) دمای سطح داخل لوله بر حسب $(^{\circ}C)$ است. در محاسبه توان حرارتی مورد نیاز سامانه پاگرما در گلخانه از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) استفاده می‌شود.

$$s = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{2w}{\pi D} \sinh \frac{2\pi z}{w}\right)} \quad (۱۰)$$

$$Q_1 = s \times k(T_2 - T_1) \quad (۱۱)$$

در این معادلات (L) طول لوله، (w) فاصله‌ی بین لوله‌ها، (D) قطر لوله و (Z) عمق قرارگیری لوله‌ها بر حسب (m)

$$A_a = N_{rf} \cdot W_0 \cdot L \quad (۱)$$

مقادیر (N_{rf}) تعداد ردیف‌های صفحات بازتاباننده، (W_0) برابر با عرض صفحات بازتاباننده و (L) طول صفحات بازتاباننده بر حسب (m) است. هم‌چنین تولید گرمای مفید توسط سامانه (Q_U) با استفاده از تعادل انرژی در حجم سیال (معادله (۲)) بر حسب وات محاسبه می‌شود (Bellos *et al.*, 2016):

$$Q_U = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (۲)$$

$$= G_b \cdot \eta_o \cdot A_a - A_r \cdot U_L \cdot (T_r - T_{am})$$

مقدار $(\dot{m})$ برابر با دبی جرمی آب برحسب کیلوگرم بر ثانیه است. (c_p) برابر با ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب $(J/kg \cdot K)$ ، (T_{in}) و (T_{out}) به ترتیب دمای ورودی و خروجی (بر حسب درجه سلسیوس) متمرکز کننده، G_b شدت تابش حرارتی خورشیدی در سطح زمین بر حسب (W/m^2) و η_o بازده حرارتی سامانه فرنل خطی است، (A_r) برابر با مساحت دریافت‌کننده (m^2) ، (U_L) برابر با ضریب اتلاف حرارتی دریافت‌کننده $(W/m^2.K)$ ، مقادیر (T_r) و (T_{am}) برابر با دمای محیط و دمای دریافت‌کننده بر حسب سلسیوس است. گرمای تولید شده توسط فرنل خطی از معادله (۳) به دست می‌آید (Bellos *et al.*, 2016):

$$Q_t = Q_s \times \eta \times A_u \quad (۳)$$

که در این معادله، (A_u) سطح جاذب، (η) بازده، (Q_s) گرمای تولید شده توسط هر سنگ از جمع‌کننده فرنل خطی و (Q_t) گرمای کل مورد نیاز سامانه است.

زاویه شیب بهینه

برای به دست آوردن زاویه ساعت (ω) در شهرکرد می‌توان از معادله (۴) استفاده کرد (Duffie *et al.*, 2020):

$$\omega = 15(h - 12.5 + \frac{E_t}{60} + \frac{L}{15} - T_z) \quad (۴)$$

در معادله بالا (E_t) رابطه زمان، (T_z) اختلاف ساعت زمانی و (L) طول جغرافیایی است. (E_t) از معادله (۵) و T_z از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

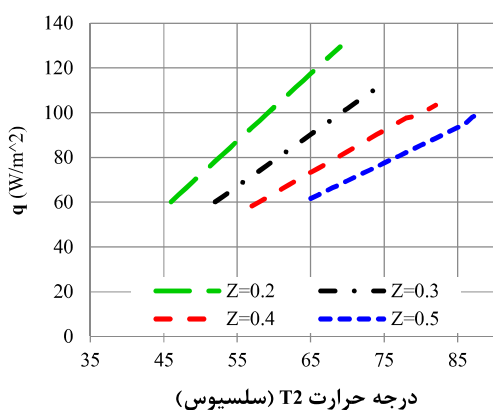
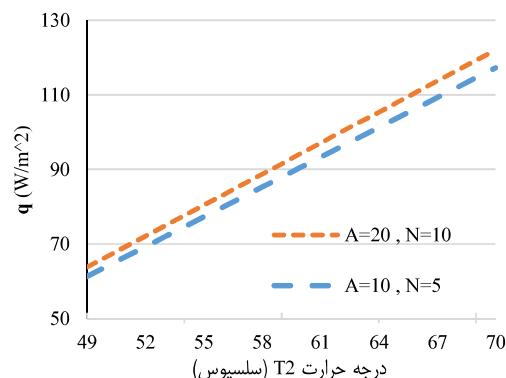
$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \delta - 0.032077 \sin \delta - 0.014615 \cos 2\delta - 0.040849 \sin 2\delta) \quad (۵)$$

$$T_z = (L + 7.5)/15 \quad (۶)$$

همچنین δ عرض جغرافیایی برای شهرکرد 32° و $50/51^{\circ}$ درجه است

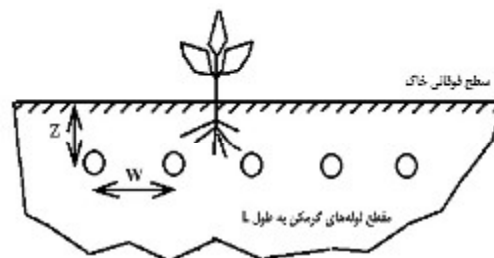
تأثیر تغییر مساحت هر بخش

شکل ۴ و ۵ تغییرات گرمای مورد نیاز سامانه بر اثر افزایش مساحت بستر پاگرم از ۱۰ مترمربع به ۱۵ مترمربع را نشان می‌دهد. تغییرات مساحت با تغییر w ، N و L همراه است که طبق نتایج تجربی و بررسی گلخانه‌ها، طول لوله‌ها ۱۰ متر ثابت در نظر گرفته شده است. افزایش مساحت شکل ۳ با افزایش w از ۰/۲ به ۰/۳ متر و با ثابت ماندن N انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش w و ثابت ماندن N میزان گرمای لازم (q) برای رساندن ریشه گیاه به دمای ۲۶ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، همان‌طور که در سال ۲۰۰۷ اعلام شد مساحت، بخش مهمی از محاسبه برای میزان گرما است و همچنین انتقال حرارت تقریباً همیشه متناسب با مساحت خواهد بود (Holman et al., 2007).

شکل ۴- تغییرات افزایش مساحت - افزایش w به $w=0.3$ و $w=0.2$ شکل ۵- تغییرات افزایش مساحت - افزایش N در $Z=0.3$

تغییر مساحت باید با توجه به فاصله ی بین لوله‌ها w و تعداد لوله‌ها N انجام شود تا نیاز گیاه را برطرف

است (شکل ۳). (Q_1) میزان گرمای لازم برای یک شاخه از لوله‌کشی، (k) هدایت حرارتی خاک، (T_1) دمای آب داخل لوله و (T_2) دمای مورد نظر ریشه گیاه است. برای به دست آوردن گرمای لازم کل شاخه‌ها به تعداد N از معادله $Q = Q_1 \times N$ استفاده می‌شود. همچنین برای به دست آوردن گرمای کل در بستر پاگرمای گلخانه از معادله ($Q = q.A.B$) استفاده می‌شود.



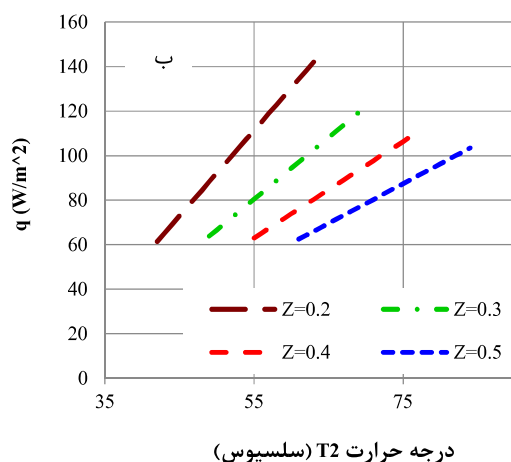
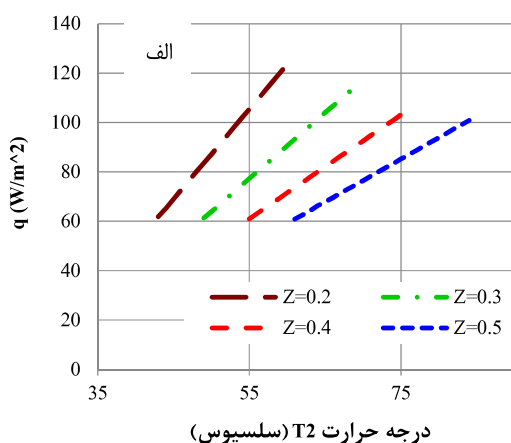
شکل ۳- شماتیک پروفیل خاک به همراه سطح مقطع لوله‌های گرمکن و عمق و فاصله آنها از یکدیگر

لازم به ذکر است که $65 < q < 130 \text{ W/m}^2$ مقدار پیشنهادی برای طراحی این سامانه و نیز A و B ابعاد سطح بستر پاگرم است. برای داشتن بالاترین بازده، طول لوله‌های حامل آب داغ نباید از ۱۰ متر بیش‌تر باشد، همچنین لوله‌های آلومینیومی و یا مسی چون دارای هزینه‌ی بسیار بالا در نصب هستند، برای طراحی سامانه‌ی پاگرم، از لوله پلی‌اتیلن با دو گزینه با قطرهای ۶ و ۹ میلی‌متر استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

گرمای مورد نیاز سامانه‌ی پاگرم تحت تأثیر ویژگی‌هایی همچون، تعداد لوله‌ها در زیر ریشه گیاه (N) و مساحت هر بخش (A)، قرار دارد. در ادامه، در مرحله‌ی اول، مساحت (A) و قطر لوله‌های سامانه (d) و تأثیر آن بر توان حرارتی و دمای مورد نیاز بررسی می‌شود، در مرحله‌ی دوم بر اساس گرمای موردنیاز سامانه، تعداد صفحات بازتابنده فرنل خطی بر حسب زاویه تابش در شهرکرد بررسی می‌شود. در مرحله‌ی سوم نوع پمپ و منبع کمکی موردنظر معرفی و مطلوب‌ترین سامانه با توجه به نمودارها پیشنهاد می‌شود.

کم، گرمای کمتری برای رسیدن به دمای مطلوب ۲۶ درجه نیاز باشد. همچنین با افزایش قطر، مقدار آب مصرفی بیش‌تر می‌شود و در نتیجه محدودیت آب به وجود می‌آید. شکل ۶ - الف نشان می‌دهد، قطر ۶ میلی‌متر می‌تواند انتخاب مناسبی برای شبکه بندی لوله‌ی پاگرما باشد.



شکل ۶- تأثیر قطر لوله در سامانه پاگرما: ۶ میلی‌متر (الف) و ۹ میلی‌متر (ب)

برای به حداقل رساندن اتلاف حرارتی لوله‌های اصلی رفت و برگشت آب گرم به سامانه پاگرما، آن‌ها را با پشم سنگ به ضخامت ۳ سانتی‌متر عایق‌بندی خواهیم کرد؛ همان‌طور که میائو و همکاران در سال ۲۰۲۳ بیان کردند که در شبکه لوله، تلفات انرژی قابل توجهی مربوط به انتقال لوله‌ها است، به این معنی که عایق پوش بودن لوله‌های رابط عامل بسیار مهمی در طراحی است (Miao et al., 2023).

نماید، زیرا برای جوانه زدن بذر یا فرآیند دیگری که به دمای بالا نیاز دارد، باید فاصله بین لوله‌ها کاهش یابد تا از رشد غیریکنواخت نهال جلوگیری شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش مساحت (با افزایش تعداد لوله‌ها و ثابت ماندن فاصله‌ی بین لوله‌ها)، میزان گرمای لازم (q) برای رسیدن به دمای مطلوب تغییری نخواهد کرد. فاصله‌ی بین لوله‌ها یک ویژگی مهم برای رشد گیاه است همان‌طور که (Awani et al., 2015) با آزمایش تجربی به این نتیجه رسیدند که فاصله‌ی بین مواد تغییر حالت دهنده‌ها بدون ایجاد مشکل برای گیاه می‌تواند ۰/۵ متر باشد. همچنین در مدل تجربی خود مواد تغییر حالت دهنده‌ها را در قسمت بزرگی از گلخانه به مساحت ۱۰۰ مترمربع مجهز نمودند که نتایج حاکی از آن بود که رشد محصولات و باروری آن‌ها افزایش یافت.

شکل ۶، تغییرات قطر لوله از ۶ میلی‌متر به ۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش قطر، میزان گرمای مورد نیاز سامانه افزایش می‌یابد. با افزایش قطر لوله‌های پاگرما، میزان دما و گرمای لازم برای رساندن ریشه گیاه به دمای مطلوب افزایش می‌یابد.

تغییر قطر لوله‌های سامانه‌ی پاگرما (d)

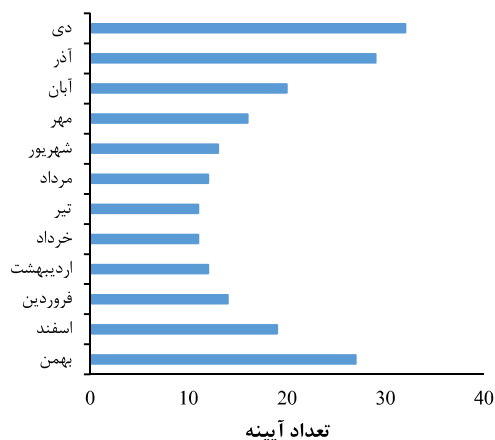
طبق قانون سرمایش نیوتون، هرچه قطر لوله افزایش یابد، میزان گرمای لازم برای رسیدن سطح مورد نظر به دمای دلخواه افزایش می‌یابد (Holman et al., 2007). در طراحی و شبیه‌سازی سامانه‌ی پاگرما سعی می‌شود جنس لوله‌ها از پلی‌اتیلن باشد تا علاوه بر هزینه‌ی کم در نصب، هزینه‌ی خرید محصول نیز کاهش یابد، همچنین اگر قطر لوله کم باشد، میزان گرما و دمای کم‌تری مورد نیاز است. همانگونه که Chopra et al. (2023) بیان کردند هزینه‌های ناشی از نصب جمع‌کننده‌های خورشیدی باید به گونه‌ای باشد که همگان برای نصب این سامانه ترغیب شوند. همچنین، ترکیب سامانه‌های حرارتی با لوله‌های حرارتی نه تنها اتلاف حرارتی را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افزایش گرما در مخزن ذخیره حرارت نیز هست (Zhang et al., 2023).

مهم‌تر از آن سامانه گرمایش، یکپارچه‌تر خواهد بود و روش‌های تنظیم ساده‌تری برای کنترل دما و گرما وجود خواهد داشت. لذا برای شبکه‌بندی پاگرما از لوله‌های پلی‌اتیلن با قطر کم استفاده می‌شود تا علاوه بر هزینه‌ی

جدول ۱- نمایش انرژی تابشی کل در ۱۲ ماه سال

ماه	$\eta \times Q_s$	سطح جاذب مورد نیاز (m ²)
بهمن	۱۹۴/۵۰	۲۹
اسفند	۲۷۵/۰۶	۲۰
فروردین	۳۵۸/۸۶	۱۶
اردیبهشت	۴۴۴/۶۱	۱۳
خرداد	۴۹۲/۲۹	۱۲
تیر	۵۰۷/۸۴	۱۱
مرداد	۵۰۱/۴۱	۱۱
شهریور	۴۶۷/۴۴	۱۲
مهر	۳۹۵/۶۷	۱۴
آبان	۲۹۷/۴۱	۱۹
آذر	۲۱۲/۵۹	۲۷
دی	۱۷۵/۳۰	۳۲

برای تأمین گرمای لازم یک گلخانه‌ی ۱۰۰ مترمربعی به ۵۸۹۸ گرما نیاز هست. جدول ۱ نشان می‌دهد، کل مساحت میدان صفحات بازتابنده برای ماه دی که سردترین ماه سال است، ۳۲ مترمربع است. بازتابنده فرنل مورد نظر دارای ۲۹ ردیف صفحه بازتابنده به طول ۳ متر و عرض ۰/۳۶ متر است. شکل ۸، نمایش مساحت میدان صفحه بازتابنده موردنیاز در ۱۲ ماه در شهرکرد را نشان می‌دهد. با ترکیب کردن سامانه گرما یعنی جمع کننده خورشیدی و منبع کمکی می‌توان تعداد صفحات خورشیدی نصب شده را کاهش داد.



شکل ۸- تعداد جمع کننده موردنیاز در گلخانه‌ای به ابعاد ۱۰۰ مترمربع در شهرکرد

عواملی که می‌تواند بر بازده یک جمع کننده تأثیر بگذارد عناصر مفید برای توصیف آب و هوا شامل نوع و زمان بارش، میزان تابش آفتاب، میانگین سرعت و جهت

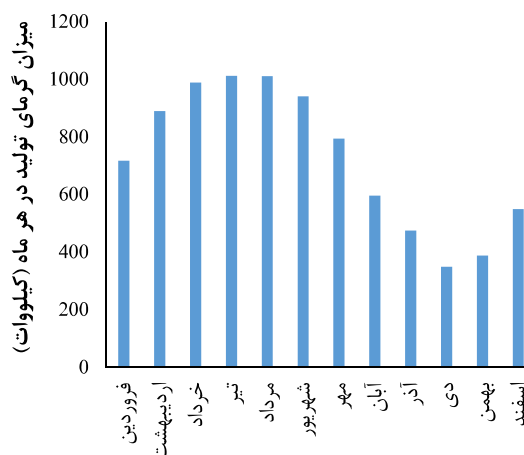
محاسبه‌ی اتلاف حرارتی در مسیر پاگرما و مخزن

بر اساس طراحی‌های موجود، چهار نوع آرایش برای چیدمان لوله‌های پاگرما وجود دارد: الف) جریان هم‌زمان، ب) جریان معکوس، ج) جریان متناوب و د) زوج حلقه با فاصله‌ی یکسان. در این پژوهش نوع آرایش، جریان هم‌زمان است که لوله‌ها در فاصله‌ی مساوی و به صورت موازی در کنار هم قرار می‌گیرند.

دمای هوای اطراف مخزن ذخیره آب گرم ۲۰ درجه‌ی سلسیوس و مخزن از جنس فولاد ضدزنگ با $k = 55 \left(\frac{W}{m.K}\right)^{-1}$ در نظر گرفته و با پشم سنگ به ضخامت ۳ سانتی‌متر عایق‌بندی شد. بر اساس معادلات ۷ الی ۵۸۸۶ وات انرژی برای گرم کردن ریشه گیاه لازم است.

انرژی تولیدی سامانه گرمایش خورشیدی

دما و میزان تابش خورشیدی عوامل مهمی برای تعیین تعداد صفحات خورشیدی و تأمین گرما است که بر اساس این مقدار، بازده حرارتی و میزان انرژی تابشی در هر مترمربع جمع کننده فرنل خطی محاسبه شد. شکل ۷ میزان گرمای تولید شده در هر ماه در شهرکرد را نشان می‌دهد. این مقادیر با توجه به زاویه تابش، زاویه ساعت و زاویه میل در شهرکرد به دست آمد.



شکل ۷- میزان گرمای تولید شده سامانه فرنل خطی در ماه‌های سال

η بر اساس ویژگی‌های شرکت سازنده محاسبه و مقدار متوسط آن برابر ۰/۶۰۲ شد. جدول ۱، نمایش انرژی تابشی کل در هر مترمربع از جمع کننده را نشان می‌دهد.

باد، تعداد روزهای بالای نقطه صفر، آب و هوای شدید و جغرافیای محلی تأثیر گذار است (Zhang et al., 2018).

گرم‌کن کمکی و پمپ

سامانه‌های ترکیبی خورشیدی و پمپ حرارتی آب گرم اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است. همچنین وجود پمپ برای سامانه‌های خورشیدی ضروری است و به دلیل هزینه‌های عملیاتی پایین‌تر در مقایسه با هزینه‌های تأمین سوخت و نگهداری نسبت به مولدهای سوختی، پمپ آب خورشیدی پیشنهاد می‌شود (Rengma et al., 2023).

پیشنهاد می‌شود در این سامانه برای به گردش در آوردن آب از یک پمپ ۳۰۰ وات استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌شود برای تأمین گرما توسط منبع کمکی از یک المنت میله‌ای فلنچ‌دار دو حالتی ۳ کیلووات استفاده شود که توان حرارتی کل سامانه خورشیدی حدود ۶۰۰۰ وات را برای اوقات شب و یا روزهای ابری فراهم کند. همچنین، انرژی خورشیدی نمی‌تواند به طور کامل جایگزین شود، پس نیاز به سوخت اضافی در ماه‌هایی که شدت خورشیدی پایین و دمای محیط پایین‌تر است، بیش‌تر است (Zhang et al., 2018).

در این پژوهش، ویژگی‌های مؤثر در طراحی سامانه‌ی پاگرم بررسی شد. با بررسی ویژگی‌های مؤثر برای طراحی سامانه‌ی پاگرم، برای یک گلخانه‌ی ۱۰۰ مترمربع به ۸ قطعه بستر پاگرم هریک با سطح ۱۰ مترمربع و با عمق خاک ۳۰ سانتی‌متر نیاز است. سرعت آب در لوله‌های حامل آب گرم ۰/۳ متر بر ثانیه است تا بتواند تأثیر مثبتی بر نرخ انتقال حرارتی داشته باشد. فاصله‌ی لوله‌ها از هم باید ۲۰ سانتی‌متر باشد تا از رشد غیریکنواخت گیاهان جلوگیری کند. تعداد لوله‌ها تأثیر زیادی بر روی میزان گرمای انتقالی ندارد و به عنوان تابعی از فاصله‌ی بین لوله‌ها در سطح مشخص شده تعیین می‌شود. به‌طور کلی سامانه‌ی پاگرم باید طوری طراحی شود که به کم‌ترین گرما و دما از سمت منبع حرارتی نیاز داشته باشد. برای به جریان درآوردن آب در این سامانه از پمپ سیرکولاتور استفاده می‌شود، زیرا این سامانه نوعی سامانه‌ی مدار بسته است، همچنین برای تأمین انرژی در شب‌ها و یا روزهای ابری، از المنت‌های حرارتی برقی موجود در مخزن استفاده می‌کنیم تا آب را گرم کنند.

محاسبه‌ی تأمین گرما بر اساس سردترین ماه سال انجام شد. برای تأمین گرما در ماه دی ۵۸۹۸ گرما نیاز هست. کل مساحت میدان صفحه بازتابنده برای ماه دی ۳۲ مترمربع تخمین زده‌شد.

نتیجه‌گیری

با توجه به مشکلات زیست محیطی و تولید آلاینده‌ها، همچنین نیاز روزافزون بشر به محصولات کشاورزی، در این مطالعه هدف مدل‌سازی سامانه‌ی پاگرم به کمک جمع‌کننده فرنل خطی به همراه یک مخزن به حجم ۲۰۰ لیتر، گرم‌کن کمکی و پمپ برای گرمایش گلخانه است. نتایج شامل تجزیه و تحلیل نظری و رابطه‌بندی نظری پدیده‌های حرارتی در شرایط آب و هوایی شهرکرد بوده است. همچنین حرارت مورد نیاز در یک گلخانه با ابعاد مشخص محاسبه و ویژگی‌های مؤثر همچون گام لوله، مساحت، تعداد لوله و قطر لوله بررسی شد و در نهایت، نمودارها و جدول‌ها ارائه شدند. لذا بر اساس موارد ذکر شده در بخش قبل، نتیجه تحلیل‌های انجام شده به شرح زیر است:

➤ با افزایش مساحت هر بخش، میزان دمای لازم برای آن افزایش می‌یابد.

➤ با افزایش قطر لوله‌های حامل سیال در زیر بستر خاک، دمای لازم برای سامانه‌ی پاگرم افزایش می‌یابد. افزایش قطر باید با توجه به افزایش سرعت سیال در لوله صورت گیرد. این سامانه نیاز به منبع کمکی دارد تا جبران‌کننده انرژی گرمایی در شب‌ها و روزهای سرد و ابری شود.

➤ بیش‌تر گلخانه‌دارها از مصرف زیاد انرژی و تولید آلاینده‌ها توسط سامانه‌ی پاگرم ناراضی بودند، با بررسی‌های لازم با نصب جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌توان هزینه‌ی مصرف انرژی و تولید آلاینده‌ها را به حداقل رساند.

➤ مدل توسعه یافته با نتایج حاصل شده برای بازتابنده فرنل خطی مختلف قابل اجرا است. از این مدل می‌توان برای ارزیابی سریع و دقیق بازتابنده فرنل خطی استفاده کرد. علاوه بر این، می‌توان برای بهینه‌سازی با استفاده از روابط اولیه به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی استفاده کرد.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است

منابع

- Anand, A., Shukla, A. & Sharma, A. (2020). Recapitulation on latent heat hybrid buildings. *International Journal of Energy Research*, 44(3), 1370-1407.
- Awani, S., Chargui, R., Kooli, S., Farhat, A. & Guizani, A. (2015). Performance of the coupling of the flat plate collector and a heat pump system associated with a vertical heat exchanger for heating of the two types of greenhouses system. *Energy conversion and management*, 103, 266-275.
- Bao, X., Yang, Y., Yang, A., Wang, N., Wang, T., Du, D., Yang, C., Wen, S. & Yang, R. (2013). Antireflection and band gap extension effects of ZnO nanocrystalline films grown on ITO-coated glasses by low temperature process. *Materials Science and Engineering: B*, 178(4): 263-266.
- Bellos, E., Korres, D., Tzivanidis, C. & Antonopoulos, K. (2016). Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16: 53-63.
- Boito, P. & Grena, R. (2016). Optimization of the geometry of Fresnel linear collectors. *Solar energy*, 135: 479-486.
- Cai, B., Ning, Y., Li, Q. & Ai, X. (2022). Effects of the chloroplast fructose-1, 6-bisphosphate aldolase gene on growth and low-temperature tolerance of tomato. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(2): 728.
- Chopra, K., Pathak, A., K., Tyagi, V. V., Pandey, K. A. & Sari, A. (2020). Thermal performance of phase change material integrated heat pipe evacuated tube solar collector system: An experimental assessment. *Energy Conversion and Management*, 203: 112205.
- Chopra, K., Tyagi, V., Popli, S. & Pandey, A. (2023). Technical & financial feasibility assessment of heat pipe evacuated tube collector for water heating using Monte Carlo technique for buildings. *Energy*, 267: 126338.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons. Esen, M. & Yuksel, T.

➤ سامانه دارای بازدهی متوسط حرارتی ۵۶ درصد است. که یک مقدار مناسب و قابل رقابت با سایر فناوری‌های مشابه است. در حالی که هزینه ساخت و نگهداری به مراتب پایین‌تری از سامانه‌های متداول برخوردار است.

➤ سامانه توانایی گرمایش آب ذخیره در منبع را تا دمای ۱۰۰ درجه در روز دارد. این مقدار تا ساعت ۱۴ قابل دسترسی است. مهم‌ترین ویژگی‌هایی که بر تولید انرژی مفید تأثیر می‌گذارند، موقعیت خورشیدی در طول روز و میزان ابر در روز است.

➤ مدل‌های پیشنهادی بر اساس استفاده از ویژگی‌های اولیه به عنوان عرض جمع‌کننده، طول، فاصله کانونی، تعداد صفحات بازتاباننده، عرض صفحه بازتاباننده و فاصله بین صفحات بازتاباننده است که می‌توان در طراحی جمع‌کننده‌های فرنل خطی از آن بهره برد.

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد بابت تأمین شرایط و هزینه تحقیق انجام شده تشکر می‌کند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

مژگان کریمی: تحقیق، گردآوری داده‌ها، نگارش و پیش‌نویس اولیه.

علی ملکی: روش کار، استاد راهنما، نگارش و ویرایش مقاله

شاهین بشارتی: استاد مشاور، نگارش و ویرایش مقاله

- configuration investigation for system installation location, sizing and deployment. *Renewable Energy Focus*, 46: 236-255.
- Wang, Y., Lu, Y. & Xiao, R. (2021). Application of nonlinear adaptive control in temperature of chinese solar greenhouses. *Electronics*, 10(13): 1582.
- Yu, T., Wang, D., Zhao, X., Liu, J. & Kim, M. K. (2022). Experimental and Numerical Study of an Active Solar Heating System with Soil Heat Storage for Greenhouses in Cold Climate Zones. *Buildings*, 12(4): 405.
- Zhang, R., Shen, G. Q., Ni, M. & Wong, J. K. (2018) heating system: Overview and meta-analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30: 164-173.
- Zhang, X., Yuan, J., Kong, X., Han, J. & Shi, Y. (2023). Coupling of flexible phase change materials and pipe for improving the stability of heating system. *Energy*, 275: 127474.
- (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, 65: 340-351.
- Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M. S., Copertaro, B., Najafi, G., Zhang, X., Aghaei, M. & Shamshiri, R. R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. *Journal of Cleaner Production*, 285: 124807.
- Holman, P., Devane, T. & Cady, S. (2007). *The change handbook: The definitive resource on today's best methods for engaging whole systems*. Berrett-Koehler Publishers.
- Hongn, M. & Larsen, S. F. (2018). Hydrothermal model for small-scale linear Fresnel absorbers with non-uniform stepwise solar distribution. *Applied Energy*, 223: 329-346.
- Kooli, S., Bouadila, S. Lazaar, M. & Farhat, A. (2015). The effect of nocturnal shutter on insulated greenhouse using a solar air heater with latent storage energy. *Solar Energy*, 115: 217-228.
- Llorach-Massana, P., Peña, J., Rieradevall, J. & Montero, J. I. (2016). LCA & LCCA of a PCM application to control root zone temperatures of hydroponic crops in comparison with conventional root zone heating systems. *Renewable Energy*, 85: 1079-1089.
- Miao, Y., Ren, J., Zhang, Y., Chen, X., Qi, M. G., Zhang, T., Li. & Liu, Y. (2023). Effect of low root-zone temperature on photosynthesis, root structure and mineral element absorption of tomato seedlings. *Science Horticulturae*, 315.
- Naveen, S. Aravind, S. Yamini, B. Vasudhareni, R. Gopinath, K. P. Arun, J. & Pugazhendhi, A. 2023. A review on solar energy intensified biomass valorization and value-added products production: Practicability, challenges, techno economic and lifecycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 137028.
- Nixon, J. & Davies, P. 2012. Cost-exergy optimisation of linear Fresnel reflectors. *Solar Energy*, 86(1): 147-156.
- Qiu, Y., He, Y. L., Cheng, Z. D. & Wang, K. (2015). Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Applied energy*, 146: 162-173.
- Rengma, N. S., Yadav, M. & Kishor, N. (2023). Solar photovoltaic water pumping system: A software tool development-based optimal