

امکان‌سنجی استفاده از سامانه پاگرما و فرنل خطی در گلخانه‌ها

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

چکیده

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 دیمه که سردترین ماه سال است، ۳۲ مترمربع است.

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

ارجاع: کریمی م، ملکی ع. و بشارتی ش. ۱۴۰۴. امکان‌سنجی استفاده از سامانه ی پاگرما و فرنل خطی در گلخانه‌ها. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۴: ۴۴-۴۳. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14492.672>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۳- مربی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

نویسنده مسئول: maleki@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

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).

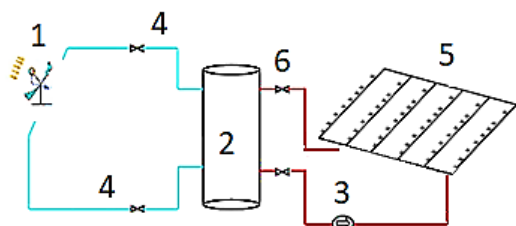
فناوری خورشیدی جایگزین مناسبی است که می‌تواند به جای منابع انرژی معمولی استفاده شود (Naveen *et al.*, 2023). سامانه‌های حرارتی انرژی خورشیدی به تنهایی قادر به تأمین گرما برای ذخیره‌سازی در حجم زیاد هستند (Esen & Yuksel, 2013). مشخص شده است که فناوری بازتابنده فرنل خطی^۲ در مقایسه با جمع‌کننده‌های سهمی دارای مزایای قابل توجهی است، به طوری که 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 پاگرما یک راه برای کاهش میزان انرژی مصرفی و افزایش باروری گیاهان است. به طور معمول این سامانه با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، 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).

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

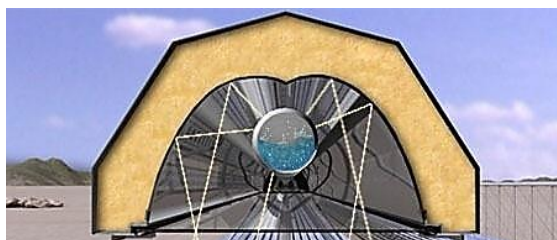
کلی، بیشتر کشاورزان میانگین دمایی ۲۶ درجه سلسیوس را در بستر ریشه گیاه‌زایی حالت بهینه معرفی کرده‌اند (Llorach-Massana et al., 2016).



شکل ۱- اجزاء سامانه‌ی پاگرم، ۱- جمع کننده 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

جمع کننده 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 جذب کوچک محدود است (Bao et al et al., 2013). بازتابنده فرنل خطی شامل بازتابنده‌های اولیه صاف یا تقریباً مسطح و یک دریافت کننده 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 این که 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 پاگرم 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 پاگرم 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 پاگرم به جمع کننده 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 جمع کننده‌های 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، جمع کننده فرنل خطی (واحد تولید حرارت) و پمپ برای انتقال آب و گرم کردن ریشه گیاه‌ی گیاهان استفاده می‌شود (شکل ۱). سیال گرم در داخل جمع کننده 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 جمع کننده 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 پاگرم 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):

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (7)$$

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):

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

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:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dx} = (2k\pi rL) \frac{dT}{dr} = \frac{2\pi k(T_1 - T_2)}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \quad (9)$$

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.

$$s = \frac{2\pi L}{\ln(\frac{2w}{\pi D} \sinh \frac{2\pi Z}{w})} \quad (10)$$

$$Q_1 = s \times k(T_2 - T_1) \quad (11)$$

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

$$A_a = N_{rf} \cdot W_0 \cdot L \quad (1)$$

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):

$$Q_U = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

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

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):

$$Q_t = Q_s \times \eta \times A_u \quad (3)$$

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):

$$\omega = 15(h - 12.5 + \frac{E_t}{60} + \frac{L}{15} - T_z) \quad (4)$$

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.

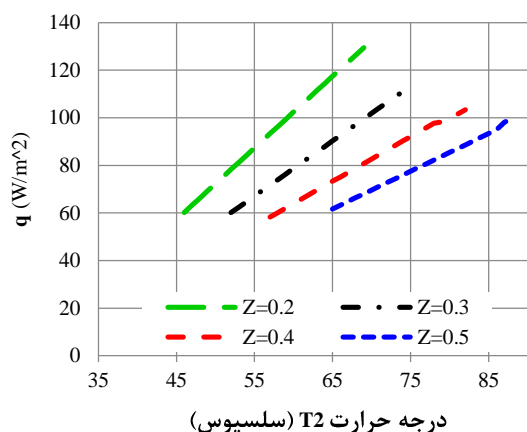
$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \delta - 0.032077 \sin \delta - 0.014615 \cos 2\delta - 0.040849 \sin 2\delta) \quad (5)$$

$$T_z = (L + 7.5)/15 \quad (6)$$

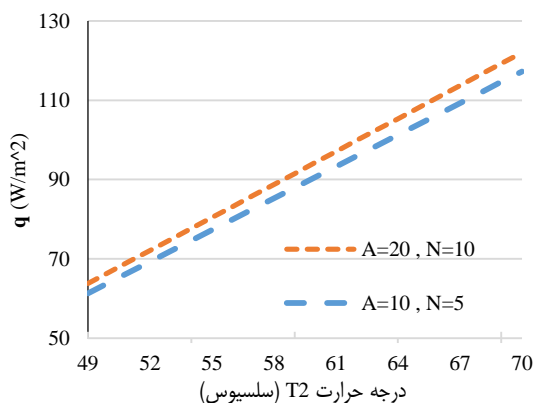
همچنین δ عرض جغرافیایی برای شهرکرد 32° و $50/51$ درجه است

تأثیر تغییر مساحت هر بخش

شکل ۴ و ۵ تغییرات گرمای مورد نیاز سامانه بر اثر افزایش مساحت بستر پاگرما از ۱۰ مترمربع به ۱۵ مترمربع را نشان می‌دهد. تغییرات مساحت با تغییر N ، w 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).



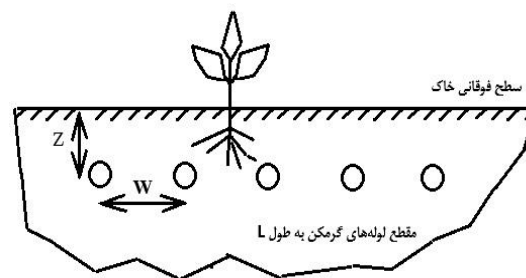
شکل ۴- تغییرات افزایش مساحت- افزایش $w=0.2$ به $w=0.3$



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 پاگرما گلخانه از معادله $(Q = q.A.B)$ استفاده می‌شود.



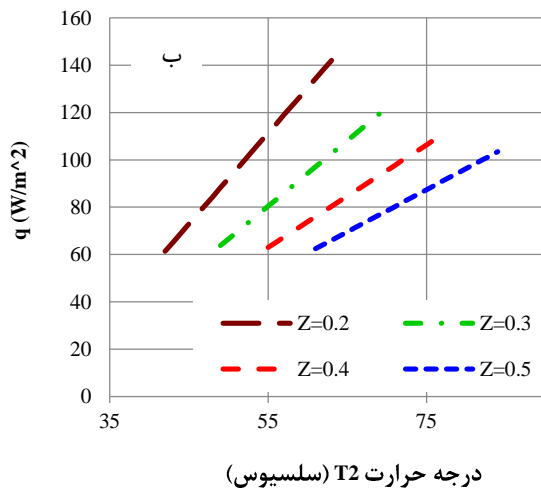
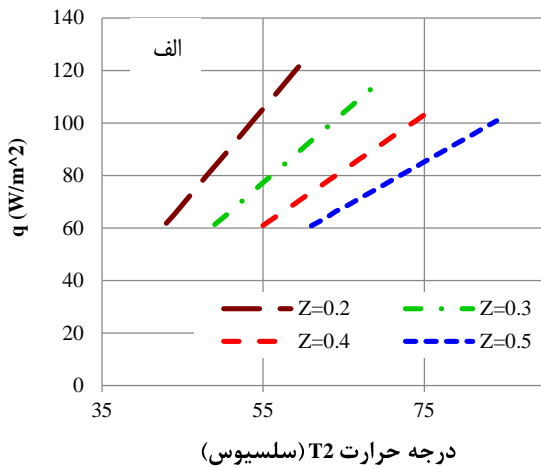
شکل ۳- شماتیک پروفیل خاک به همراه سطح مقطع لوله‌های گرمکن و عمق و فاصله آنها از یکدیگر

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 پاگرما 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 پاگرما، از لوله پلی‌اتیلن با دو گزینه با قطرهای ۶ و ۹ میلی‌متر استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

گرمای مورد نیاز سامانه‌ی پاگرما 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 مورد نیاز سامانه، تعداد صفحات بازتاباننده فرنل خطی بر حسب زاویه تابش در شهرکرد بررسی می‌شود. در مرحله‌ی سوم نوع پمپ و منبع کمکی مورد نظر 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 می‌آید 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 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 سرمایه‌ی 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 جذب 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 مورد نیاز 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 مورد نیاز 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

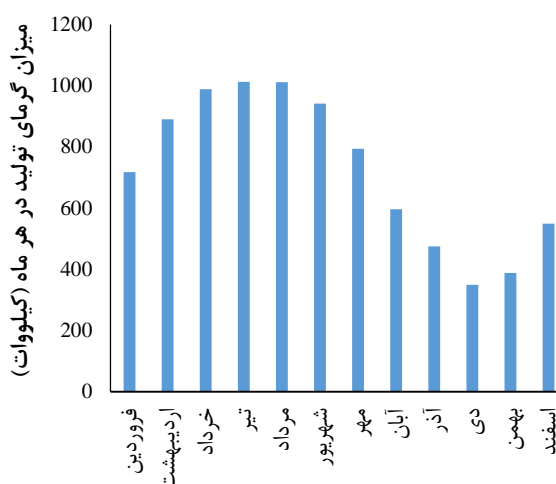
محاسبه‌ی اتلاف حرارتی در مسیر پاگرما و مخزن

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 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

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.

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 پاگرما 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 پاگرما 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 پاگرما 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.

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 فلنج‌دار 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 پاگرما بررسی شد. با بررسی ویژگی‌های مؤثر برای طراحی سامانه‌ی پاگرما، برای یک گلخانه‌ی ۱۰۰ مترمربع به ۸ قطعه بستر پاگرما هر یک 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 پاگرما 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.

- 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. (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
- 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 دسترس است. مهم‌ترین ویژگی‌هایی که بر تولید انرژی مفید تأثیر می‌گذارد، 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 فرنیل خطی از آن بهره برد.

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.

- 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 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.

Research paper

Feasibility Study of Utilizing Root-Zone Heating and Linear Fresnel Systems in Greenhouses

M. Karimi¹, A. Maleki^{2*} and Sh. Besharati³

abstract

Heating the roots can significantly affect the quality and growth of the crop as well as reduce fuel consumption in the greenhouse. Therefore, the heating system is one of the most important needs of greenhouses in the cold season. In the present research, a combined Root-Zone system with the help of solar heating for a greenhouse was theoretically investigated in Shahrekord (orbit of 32 degrees latitude and 51 degrees longitude). This system has a linear Fresnel provider that provides the heat needed to reach a temperature of 26 degrees during the day. The results show that the changes in the diameter, the pitch of the pipes, and the area of each section affect the amount of heat supplied from the collector. In other words, by increasing the diameter of the pipes from 6 to 9 mm and the pitch of the pipes from 0.2 m to 0.3 m, the required heat of the system increases. Also, the total area of flat reflectors field Square for December, which is the coldest month of the year, is 32 square meters.

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

Citation: Karimi M. Maleki A and Besharati Sh. 2025. Feasibility Study of Utilizing Root-Zone and Linear Fresnel Systems in Greenhouses ., Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 34: ??-??. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14492.672>

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.

*Corresponding Author: maleki@sku.ac.ir

Received: 2023/08/15 Accepted: 2024/12/30

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14492.672>