نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۲، سال ۱۳۹۷، صفحات ۳۲۷ تا ۳۳۶
DOI: 10.22060/mej.2016.684

بررسی تجربی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایشی یک گلخانه خورشیدی

محمدرضا عصاری*، احمد علی‌پور، رضا نصیری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

چکیده: در این مقاله به بررسی تجربی تأثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایشی یک گلخانه خورشیدی آزمایشی ساخته شده در دزفول پرداخته شده است. پس از ساخت گلخانه‌ای به مساحت ۳ متر مربع، این گلخانه به یک سیستم گرمایشی شامل یک مخزن آب حاوی ۱۸ کیلوگرم پارافین واکس با دمای ذوب ۵۵°C و گرمای نهان ذوب ۱۹۰kJ/kg و دو عدد کلکتور صفحه تخت تجهیز شده است. به منظور بررسی میزان تأثیر استفاده از این روش ذخیره‌سازی انرژی ، تغییرات دمایی خاک بستر گلخانه، داخل گلخانه و همچنین محیط پیرامون آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد که دمای متوسط مخزن هنگام ذخیره‌ی انرژی به مقدار بیشینه ۶۷°C رسیده است. شب هنگام در طی بازیافت انرژی از مخزن، در ساعات ابتدایی به علت اختلاف دمای زیاد مخزن و گلخانه، نرخ انتقال حرارت و لذا اختلاف دمای ورودی و خروجی مخزن نسبت به ساعات انتهایی بیشتر بوده و همچنین نرخ کاهش دمای مخزن بیشتر است. کمینه دمای شبانه‌ی گلخانه ۳°C افزایش یافته و حدود ۴°C افزایش برای متوسط دمای شبانه حاصل شده است. هم‌چنین ۶ تا ۸ درجه سانتیگراد افزایش دما در لایه‌های مختلف خاک حاصل شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۰ تیر ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۴ مهر ۱۳۹۵
پذیرش: ۲ آبان ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۵ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:
گلخانه خورشیدی
سیستم‌های حرارتی
ماده تغییر فاز دهنده
گرمای نهان

۱- مقدمه

در طی دو دهه‌ی اخیر استفاده از گلخانه‌های کشاورزی رشد قابل توجهی پیدا کرده است. نخستین هدف یک گلخانه این است که محصول بیشتری خارج از فصل تولید فراهم آورد. برای رسیدن به این هدف باید عوامل محیطی مؤثر بر رشد گیاه (دما، رطوبت نسبی و نور) را تحت کنترل درآورد. کارایی یک گلخانه علاوه بر دما و رطوبت نسبی به پارامترهای دیگری از جمله اندازه گلخانه، نوع پوشش، روش ذخیره انرژی، دمای مطلوب گلخانه، موقعیت مکانی و شرایط محیط پیرامونی وابسته است. با مجهز کردن گلخانه به یک سیستم ذخیره انرژی حرارتی[1] مناسب، می‌توان شرایط دمایی بهینه را تأمین کرد. سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی متناسب با نوع نیاز گلخانه وظیفه سرمایش و یا گرمایش آن را بر عهده دارند. از طرفی غیر قابل اعتماد بودن اکثر منابع انرژی به دلیل معایبی از جمله عدم تأمین پایدار، نوسانات شدید قیمت و مشکلات زیست محیطی سبب روی آوردن محققان به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر و پایدار مانند انرژی خورشیدی شده است که امروزه در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی مورد استفاده در گلخانه‌ها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. رویکرد استفاده بدون واسطه از انرژی‌های تجدید پذیر برای گرمایش، نسبت به رویکردهای دیگر دارای برتری بوده و به دلیل حذف تبدیل‌های غیر ضروری بازدهی آن نیز بسیار بیشتر است.

در اکثر سیستم‌های خورشیدی کلکتور و مخزن از اجزاء اصلی هستند. عملکرد اصلی یک کلکتور گردآوری تشعشعات خورشیدی در طی روز و تبدیل انرژی خورشیدی یا تابش خورشیدی به شکل قابل کاربرد و قابل ذخیره است. کلکتورهای خورشیدی به دو دسته کلی غیر تمرکزی و تمرکزی تقسیم می‌شوند که در کلکتورهای غیر تمرکزی مساحت کلکتور با مساحتی که تابش را جذب می‌کند برابر است. کلکتورهای صفحه تخت از نوع غیر تمرکزی هستند. با توجه به منقطع و پاره‌ای بودن انرژی منبع در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی خورشیدی، وجود محیطی برای ذخیره انرژی حرارتی الزامی است. انرژی گرمایی را می‌توان به دو روش گرمای محسوس و گرمای نهان در یک مخزن ذخیره نمود.

از پر کاربردترین سیستم‌های گرمایشی نوین به کار رفته در گلخانه‌ها می‌توان به ذخیره‌سازی به کمک مخازن آب[2]، ذخیره‌سازی با بستر سنگی[3] و ذخیره‌سازی به کمک مواد تغییر فاز دهنده اشاره کرد. همچنین استفاده از عایق متحرک[4] و ذخیره‌سازی با دیوار شمالی[5] از جمله روش‌های نوین ذخیره انرژی به منظور افزایش دمای گلخانه می‌باشند. برای سرمایش گلخانه نیز از روش‌هایی مانند تهویه استفاده می‌شود. در سیستم‌های ترکیبی، گرمایش گلخانه در زمستان و سرمایش آن در تابستان مد نظر قرار می‌گیرد. سیستم

1 Thermal Energy Storage System (TESS)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mr_assari@yahoo.com

2 Water storage
3 Rock bed storage
4 Movable insulation
5 North wall

مبدل حرارتی بین زمین و هوا[1] یکی از موفقیت‌آمیزترین سیستم‌های ترکیبی بوده که گرمایش گلخانه در زمستان و سرمایش آن در تابستان را فراهم می‌آورد [۱].

یکی از کارآمدترین روش‌های ذخیره انرژی حرارتی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده است. به کمک ذخیره انرژی حرارتی با استفاده از روش گرمای نهان می‌توان انرژی حرارتی را با چگالی بسیار بالا ذخیره کرد. همچنین انجام این فرآیند در شرایط تقریباً هم‌دما صورت می‌گیرد. مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند در طی فرایند تغییر فاز (جامد به مایع) مقدار زیادی انرژی را در طی یک چرخه ذخیره حرارت، ذخیره نمایند. در فرآیند مصرف انرژی، معمولاً یک سیال عامل (آب یا هوا) حرارت را از مخزن ذخیره انرژی به محیط مورد نظر انتقال داده و باعث تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده به حالت جامد می‌شود. فراوانی مواد تغییر فاز دهنده با دماهای ذوب و انجماد مختلف در یک بازه دمایی وسیع، آنها را برای کاربردهای مختلف مناسب کرده است. برای کاربردهای مربوط به ذخیره انرژی حرارتی در گلخانه‌ها، مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب ۱۵ تا ۶۵ درجه سانتیگراد حائز اهمیت هستند [۲].

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه‌ها انجام شده است. در مطالعه‌ای که توسط تاکاکورا و نیشینا [۳] انجام گرفت از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی در گلخانه‌ای با سطح $7/2\ m^2$ استفاده گردید. در این تحقیق از کلرید کلسیم شش‌آبه با دمای ذوب ۲۹/۴ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان $170/1\ kJ/kg$ استفاده شد. هم‌چنین سه نوع واحد ذخیره انرژی متفاوت ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفتند. برای کارآمدترین واحد ذخیره انرژی از میان سه سیستم طراحی شده، در حالی‌که دمای محیط خارج گلخانه به ۰/۶- درجه سانتی‌گراد رسیده بود دمای داخل گلخانه به ۸ درجه سانتی‌گراد رسید.

هوانگ و همکاران [۴] در مرکز تحقیقات کشاورزی کارولینای شمالی برای ذخیره انرژی در یک گلخانه کوچک خورشیدی از کلسیم کلرید شش آبه با دمای ذوب ۲۷/۲۲ درجه سانتی‌گراد به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده کردند. نتیجه این تحقیق نشان داد که مواد تغییر فاز دهنده ظرفیت ذخیره انرژی بسیار بیشتری نسبت به سیستم ذخیره انرژی با بستر سنگی دارند. بیل و بولارد [۵] در یک مطالعه‌ی تجربی از کلرید کلسیم شش آبه با دمای ذوب 21^oC در گلخانه‌ای با تهویه اجباری و مساحت $176\ m^2$ استفاده کردند. در این تحقیق ۲۱۰۵kg ماده تغییرفاز دهنده درون ۸۴۲ محفظه استفاده گردید. تنظیمات دمایی گلخانه در ماه فوریه برای شب 12^oC و دمای روز 14^oC، در ماه مارس برای شب 22^oC و برای روز 26^oC انجام شد. با استفاده از این روش ٪۴۰ از بار گرمایشی مورد نیاز گلخانه تأمین گردید. هم‌چنین هنگامی که دمای محیط در ماههای فوریه و مارس به ترتیب $3/8^oC$ و $6/6^oC$ بوده، دماهای $10/9^oC$ و $13/5^oC$ درون گلخانه حاصل شد. تنها تحقیقی که در آن از پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فازدهنده استفاده شده توسط باستینسلیک و همکاران [۶] انجام گرفته است. آنها از پارافین واکسی با دمای ذوب بین ۴۸ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ذوب ۱۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم استفاده کردند. سطح گلخانه ۲۰۰ مترمربع و پوشش آن از پلاستیک بوده و مقدار ۶۰۰۰ کیلوگرم ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده قرار گرفت. ۱۸ عدد کلکتور هوا گرم‌کن با سطح هرکدام ۵ مترمربع به مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده کوپل شد. نتایج آزمایش نشان داد مواد تغییر فاز دهنده تأثیری مثبت در بالا نگهداشتن دمای گلخانه دارد.

حسین و ایدین [۷] در آزمایشی در ترکیه کارایی حرارتی یک واحد ذخیره حرارت شامل مواد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار دادند. واحد ذخیره انرژی شامل ۱۰ عدد کلکتور هوا گرمکن خورشیدی بوده که برای گرمایش هوای داخل گلخانه و ذخیره انرژی در مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده ($Cacl.6H_2O$) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که سیستم گرمایشی شامل کلکتورهای هوا گرمکن و ماده تغییر فاز دهنده ۱۸ تا ۲۳ درصد نیاز کل روزانه انرژی حرارتی گلخانه را برای ۳ تا ۴ ساعت تأمین می‌کند. این سیستم اختلاف دمای ۶ تا ۹ درجه سانتی‌گرادی بین هوای داخل گلخانه و محیط فراهم آورده است.

بروگ و همکاران [۸] در مراکش استفاده از مواد تغییر فازدهنده در دیوار شمالی گلخانه را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به این که برای گلخانه‌های با راستای غرب به شرق در طی فصل زمستان بیشینه تشعشع خورشیدی روی دیوار جنوبی گلخانه افتاده و کسری از این تشعشع خورشیدی از دیوار شمالی گلخانه خارج می‌شود، در این طرح یک دیوار شمالی حاوی مواد تغییرفاز دهنده به منظور جذب و بازتاب تشعشعات خورشیدی پیشنهاد گردید. در طی روز تشعشعات برخوردی به دیوار شمالی، ذخیره حرارتی آن را بالا برده و این انرژی از طریق انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشع به گلخانه می‌رسید. در این مطالعه ۶ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دما برای هوای داخل گلخانه در طی شب حاصل گردید. سالوا و همکاران [۹] به بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده روی دما و رطوبت گلخانه پرداختند و عملکرد حرارتی یک هواگرمکن خورشیدی جدید (شامل بستری از کپسول‌های کروی حاوی مواد تغییر فاز دهنده) را مورد ارزیابی قرار دادند. گرمای مازاد نیاز روزانه گلخانه در بستر حاوی مواد تغییر فاز دهنده ذخیره شده و شب هنگام استخراج می‌شد. نتایج به‌دست آمده از این طرح نشان داد که گرمای باز گرفته شده از کلکتور در طی شب ٪۳۱ نیاز گرمایشی کل گلخانه را فراهم آورده است. هم‌چنین کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی در رطوبت نسبی حاصل گردید. دمای شبانه داخل گلخانه مجهز به سیستم گرمایشی به طور متوسط حدود 5^oC از گلخانه سنتی بیشتر بود. ماریم و همکاران [۱۰] به ارزیابی یک واحد ذخیره انرژی نهان در یک گلخانه تونلی پرداختند. در این تحقیق، واحد ذخیره انرژی نهان از یک مبدل حرارتی پلی پروپیلنی که با ماده تغییر فاز دهنده پر شده ساخته شد. کلرید کلسیم شش آبه با دمای ذوب ۲۶ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد و گرمای نهان ذوب $190/8\ kJ/kg$ به عنوان ماده تغییر فازدهنده مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم ذخیره انرژی نهان، دمای داخل گلخانه را در طی روز ۵ تا ۸ درجه سانتی‌گراد کاهش و در طول شب 4^oC افزایش می‌دهد.

1 Earth to Air Heat Exchanger System (EAHES)

در آزمایشاتی که تاکنون انجام گرفته، مقدار ماده تغییر فازدهنده به‌کار رفته برای هر متر مربع از سطح گلخانه متفاوت بوده و دارای مقادیر کمینه ۴/۸۴ کیلوگرم بر مترمربع و بیشینه ۸۳/۳ کیلوگرم بر مترمربع است. تمامی مطالعات انجام شده بر این امر دلالت دارند که مواد تغییر فاز دهنده را هم برای ذخیره انرژی و هم برای کنترل رطوبت گلخانه می‌توان مورد استفاده قرار داد. در تمامی مطالعاتی که در آن‌ها از کلکتورهای خورشیدی استفاده شده، تنها کلکتورهای هوا گرمکن مورد استفاده قرار گرفته و از هوا به عنوان سیال ناقل حرارت استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی میزان کارایی یک سیستم ذخیره انرژی برای گلخانه است که در این سیستم از کلکتور آب گرمکن استفاده شده است و ماده تغییر فاز دهنده به عنوان محیط ذخیره انرژی به کار رفته است. در این سیسنم حرارتی علاوه بر گرمایش هوای داخل گلخانه،گرمایش خاک بستر گلخانه نیز مد نظر قرار گرفته است.

۲- معادله‌های ذخیره انرژی حرارتی

به طور کلی سه روش برای ذخیره‌ی انرژی حرارتی وجود دارد: ذخیره‌ی انرژی با گرمای محسوس؛ ذخیره‌ی انرژی با گرمای نهان، و ذخیره‌ی انرژی به روش ترموشیمیایی.

۲- ۱- گرمای محسوس

درسیستم‌های ذخیره انرژی با گرمای محسوس، انرژی حرارتی با افزایش دمای یک جامد یا مایع ذخیره می‌شود. حرارت ذخیره شده به ظرفیت گرمایی محیط ذخیره‌ی انرژی، تغییرات دما و جرم ماده ذخیره کننده وابسته است. گرمای ذخیره شده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_{ap}(T_f - T_i) \quad (۱)$$

که در آن:

Q : حرارت ذخیره شده (ژول)

T_f : دمای نهایی (درجه سانتی‌گراد)

T_i : دمای اولیه (درجه سانتی‌گراد)

m : جرم ماده ذخیره کننده انرژی (کیلوگرم)

C_P : گرمای ویژه (ژول بر کیلوگرم – کلوین)

C_{ap} : گرمای ویژه متوسط در بازه دمای اولیه تا دمای نهایی (ژول بر کیلوگرم – کلوین)

۲- ۲- گرمای نهان

در سیستم‌های ذخیره انرژی با گرمای نهان، از انرژی جذب شده در حین فرآیند تغییر فاز استفاده می‌شود. حرارت ذخیره شده در ماده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad (۲)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (۳)$$

که در آن :

T_m : دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)

a_m : کسری از جرم ماده که ذوب شده

Δh_m : گرمای ذوب در واحد جرم (ژول بر کیلوگرم)

C_{sp} : گرمای ویژه متوسط برای فاز جامد در بازه دمای اولیه تا دمای ذوب (ژول بر کیلوگرم – کلوین)

C_{lp} : گرمای ویژه متوسط برای فاز مایع در بازه دمای ذوب تا دمای نهایی (ژول بر کیلوگرم – کلوین)

۲- ۳- گرمای ترموشیمیایی

انرژی ترموشیمیایی حرارت جذب شده و یا آزاد شده در حین فرآیند واکنش‌های شیمیایی گرماگیر و گرمازا است. میزان ذخیره انرژی به مقدار ماده ذخیره کننده، گرمای واکنش و میزان تبدیل وابسته است. حرارت ذخیره شده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = a m \Delta h_r \quad (۴)$$

که در آن :

a_r : کسری از جرم ماده که در واکنش شرکت کرده

Δh_r : گرمای واکنش گرماگیر (ژول بر کیلوگرم)

۳- نحوه آماده سازی دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

در شکل ۱ طرحواره‌ای از گلخانه و سیستم گرمایشی طراحی شده و در شکل ۲ نمای واقعی از این سیستم خورشیدی ارائه شده است. این سیستم خورشیدی از اجزاء زیر تشکیل شده است:

گلخانه و مبدل‌های حرارتی تعبیه شده در آن، کلکتورهای خورشیدی، مخزن آب به همراه محفظه‌های حاوی ماده تغییر فازدهنده، ماده تغییر فازدهنده، داده‌بردار دما، الکتروپمپ سیرکولاتور آب.

۳- ۱- گلخانه و مبدل حرارتی تعبیه شده در آن

سازه‌های گلخانه‌ای برای تولید محصولات مختلف در انواع مختلفی ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق با توجه به این‌که گرمایش گلخانه مد نظر بوده، از میان شکل‌های رایج گلخانه‌های تک واحدی، نوع دهانه مساوی از طرفین انتخاب شده است که سقف آن از دو طرف دارای شیب یکسان است و از نظر میزان جذب تشعشع جزء انواعی است که حداکثر مقدار جذب را داراست [۱۱]. جنس اسکلت گلخانه به منظور

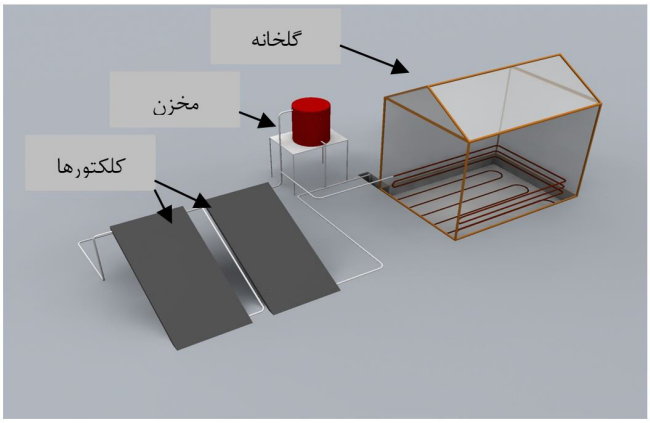

Fig. 1. Schematic view of greenhouse and heating system

شکل ۱: نمای شماتیکی از گلخانه و سیستم گرمایشی

Fig. 2. Actual view of solar system

شکل ۲: نمای واقعی از سیستم خورشیدی

استحکام مناسب از فلز انتخاب شد، مساحت گلخانه ساخته شده ۳ متر مربع بوده و ارتفاع دیواره‌های کناری ۱/۵ متر و ارتفاع در مرکز ۱/۹ متر است.

محل استقرار گلخانه، سایت خورشیدی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول بوده و به منظور بیشینه بودن مجموع تشعشع رسیده به گلخانه امتداد طولی آن در راستای شرق به غرب قرار گرفت. برای آماده‌سازی بستر گلخانه ابتدا سطح مورد نیاز گلخانه به ارتفاع ۳۰ سانتیمتر خاکبرداری شد. پس از خاکبرداری بستر گلخانه، کف گلخانه با یونولیت به ضخامت ۵ سانتیمتر

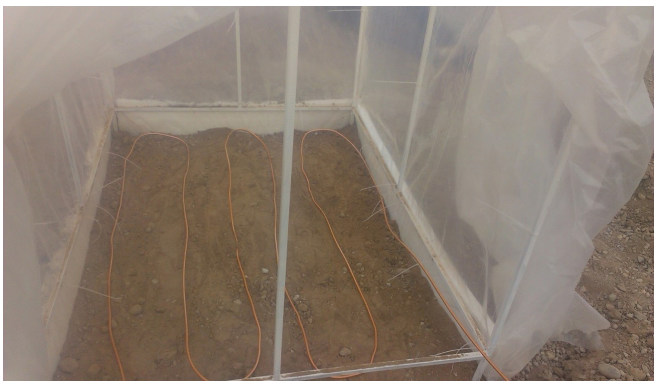

Fig. 3. The cupric tube in the floor of greenhouse

شکل ۳: لوله مسی در کف گلخانه

عایق و پس از استقرار اسکلت فلزی، پوشش پلاستیکی گلخانه روی آن کشیده شد.

در ادامه روی یونولیت به ارتفاع ۵ سانتی متر خاک ریخته شده و سپس لوله مسی (به عنوان مبدل حرارتی) در کف گلخانه تعبیه شد. فاصله خطوط لوله مسی در کف گلخانه از یکدیگر ۲۰ سانتی‌متر بوده به‌طوری که ۶ خط لوله در امتداد طولی گلخانه قرار گرفت. سپس روی لوله مسی خاک ریخته شد به طوری که در نهایت این لوله‌ها در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری زیر سطح گلخانه قرار گرفتند (شکل۳). همچنین لوله مسی در وجه‌های شمالی، جنوبی و شرقی گلخانه در فاصله ۱۰ سانتی‌متری دیواره‌ها امتداد داده شد به‌طوری که در هر وجه ۳ امتداد به فاصله عمودی تقریبا ۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفتند. در شکل ۴ تصویری از گلخانه بعد از تعبیه لوله مسی مشاهده می‌شود. قطر لوله مسی سه هشتم اینچ بوده، ضخامت آن ۰/۶۳ میلیمتر و طول کلی آن ۲۸ متر است. پس از تعبیه مبدل حرارتی، داخل گلخانه سه ردیف گیاه خیار (یکی از محصولات رایج گلخانه‌ای در فصل زمستان) کاشته شد (شکل۵).

۳- ۲- کلکتورهای خورشیدی

یکی از اجزای اصلی سیستم گرمایشی کلکتور است که وظیفه آن در سیستم، گردآوری انرژی تشعشعات خورشیدی در طی روز است. کلکتورهای

Fig. 4. The cupric tube in the edges of greenhouse

شکل ٤: لوله مسی امتداد یافته در کناره‌های گلخانه

Fig. 5. The view of in the greenhouse in first days of planting cucumber

شکل ٥: نمایی از داخل گلخانه در روزهای اول کاشت گیاه خیار

مورد استفاده از نوع کلکتورهای دو منظوره بوده که قابلیت گرمایش همزمان هوا و آب را دارند. در این تحقیق از این کلکتورها استفاده تک منظوره (فقط برای گرمایش آب) شده است . این کلکتورها از نوع کلکتورهای صفحه تخت بوده و حرارت جذب شده را می‌توانند به دو سیال عامل هوا و آب انتقال دهند. دو کلکتور خورشیدی مورد استفاده، به صورت سری به یکدیگر متصل شدند. تصویر این کلکتورها در شکل ۲ مشاهده می‌شود که مشخصات کلکتور شماره ۱ به شرح زیر است:

- پوشش کلکتور از جنس شیشه بوده و دارای ضخامت ۶ میلیمتر است؛
- ضخامت عایق زیرین ۴ سانتی متر و ضخامت عایق در کناره‌های کلکتور ۲ سانتی متر است؛
- صفحه جاذب از جنس آلومینیوم با ضخامت ۱ میلیمتر و دارای مساحت در معرض تابش ۱/۷۱ متر مربع است؛
- جنس لوله‌های داخل کلکتور از مس بوده و قطر لوله‌های رایزر و هدر به ترتیب ۱۰ و ۱۶ میلیمتر است؛
- تعداد لوله‌های رایزر ۷ عدد است.

مشخصات کلکتور شماره ۲ نیز بدین شرح است:

- پوشش کلکتور از جنس شیشه بوده و دارای ضخامت ۶ میلیمتر است،
- ضخامت عایق زیرین و عایق در کناره‌ها ۴/۵ سانتیمتر،
- جنس صفحه جاذب از آلومینیوم با ضخامت ۱ میلیمتر و ابعاد ۰/۹۱ ×۱/۹۱ متر،
- قطر لوله‌های رایزر ۱۰ میلیمتر و تعداد آنها ۱۲ عدد است.

۳- ۳- مخزن آب به همراه محفظه‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده

مخزن مورد استفاده از فولاد گالوانیزه با ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر بوده و دارای قطر ۴۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۵ سانتی‌متر است (شکل۶). در فاصله ۳ سانتی‌متری کف مخزن سوراخی به قطر ۰/۵ اینچ جهت خروج آب از مخزن و ورود به کلکتور و گلخانه تعبیه شده است. حجم مخزن ۱۴۱ لیتر است. هنگام استفاده از مخزن، جداره خارجی آن به طور کامل با پشم شیشه به ضخامت ۵ سانتی‌متر عایق‌بندی شده است.

برای بهره‌گیری از مواد تغییر فاز دهنده به محفظه‌هایی نیاز است که این مواد درون آن‌ها قرار گیرند. این محفظه‌ها با توجه به شرایط محیط پیرامونی باید در برابر خوردگی و حرارت مقاوم بوده و به منظور عملکرد بهتر در سیستم گرمایشی طراحی شده، از ضریب هدایت حرارتی مناسبی برخوردار باشند. از این رو محفظه‌های استوانه‌ای از جنس آلومینیوم با ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر انتخاب شده و پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فازدهنده درون آنها ریخته شد. مقدار کل پارافین واکس به کار رفته در سیستم ۱۸ کیلوگرم است که داخل ۹۸ محفظه آلومینیومی قرار گرفته است. هر کدام از محفظه‌ها تقریباً با ۱۸۰ میلی‌لیتر پارافین واکس پر شده و درون یک شبکه طراحی شده متناسب با ابعاد مخزن قرار داده شدند. نمایی از شبکه مواد تغییر فاز دهنده متناسب با ابعاد مخزن در شکل ۷ نشان داده شده است.

Fig. 6. View of tank

شکل ٦: نمایی از مخزن

Fig. 7. The network of PCMs

شکل ۷: شبکه مواد تغییر فاز دهنده

۳- ۴- ماده تغییر فاز دهنده

در سیستم‌های ذخیره انرژی با گرمای نهان، از انرژی جذب شده و آزاد شده در حین فرآیند تغییر فاز مانند جامد–جامد، جامد–مایع، مایع–گاز و جامد–گاز استفاده می‌شود. آنتالپی در فرایند تغییر فاز حالت گذار جامد–جامد معمولاً کوچک است. آنتالپی تغییر فاز مایع–گاز و جامد–گاز بیشتر از آنتالپی تغییر فاز جامد–جامد و جامد–مایع است ولی این سیستم‌ها دارای مشکلاتی از جمله تغییرات حجم زیاد در حین فرآیند تغییر فاز بوده و نیاز به مخزن تحت فشار دارند. اگرچه در فرآیند تغییر فاز جامد–مایع گرمای نهان کمتر است، ولی در این سیستم‌ها تغییر حجم کوچک‌تری در حین فرایند تغییر فاز رخ می‌دهد. سیستم‌های تغییر فاز جامد–مایع به این دلیل که ظرفیت ذخیره انرژی حرارتی بالایی در واحد حجم به همراه تغییرات حجم کمتر دارند بیشتر مورد توجه محققان و طراحان سیستم‌های ذخیره

انرژی حرارتی قرار گرفته‌اند. پارافین واکس‌ها از نظر شیمیایی خنثی، بی اثر و ایمن بوده و می‌توانند بدون مادون سرد شدن به تدریج ذوب شوند. پارافین واکس‌ها ترکیبات هیدروکربنی اشباع شده از آلکان‌ها هستند. آلکان‌ها با فرمول C_nH_{2n+2} مشخص می‌شوند. در این مواد با افزایش طول زنجیرکربن نقطه ذوب افزایش می‌یابد. در این پروژه از پارافین واکس با دمای ذوب ۵۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شده که خواص ترموفیزیکی آن در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص ترمو فیزیکی پارافین واکس استفاده شده

Table 1. The thermo physical properties of used paraffin wax

خواص	مقادیر
k ضریب هدایت حرارتی(مایع یا جامد)	۰/۲۲ W/m k
ρ چگالی (مایع یا جامد)	۷۹۰ kg/m^3
C_p گرمای ویژه (مایع یا جامد)	۲/۱۵ kJ/kg.k
λ گرمای نهان ذوب	۱۹۰ kJ/kg
دمای ذوب	۵۵ °C
ضریب انبساط گرمایی مایع	۰/۰۰۱
α ضریب پخش حرارتی	۱/۲۹× ۱۰$^{-۷}$

۳- ۵- داده‌بردار دما

در این پژوهش از یک داده‌بردار دیجیتال مجهز به حسگر DS18b20 برای اندازه‌گیری دماها استفاده شده است. این حسگرها کالیبره شده کارخانه بوده و محدوده دمایی ۵۵- تا ۱۲۵+ درجه سانتی‌گراد را با دقت ۰/۱°C اندازه‌گیری می‌کنند.

۳- ۶- الکتروپمپ سیرکولاتور آب

با توجه به این که سیستم مدارهای ذخیره و بازیافت انرژی از نوع سیستم جابه‌جایی اجباری بوده، بعد از خروجی مخزن از یک الکتروپمپ استفاده شده که مشخصات فنی این الکتروپمپ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات الکتروپمپ سیرکولاتور آب

Table 2. The characteristics of water circulator electric pump

گروه پمپیران	شرکت سازنده
۴۶ وات	توان
۲۲۰ ولت	ولتاژ
۵۰ هرتز	فرکانس
۴ متر	بیشینه هد
۴۰-۵ لیتر بر دقیقه	دبی
۱۱۰ درجه سانتیگراد	دمای بیشینه
۶ بار	فشار بیشینه

۳- ۷- نحوه انجام آزمایش‌ها

این سیستم خورشیدی در سایت خورشیدی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول نصب شد که از لحاظ موقعیت جغرافیایی در ۳۲/۳ درجه شمالی و عرض جغرافیایی ۴۸/۲ درجه شرقی قرار دارد. ابتدا آب از پایین‌ترین قسمت مخزن ذخیره توسط پمپ سیرکولاتور آب مکش شده و با دبی ۰/۱ لیتر بر ثانیه به ورودی کلکتور شماره ۱ هدایت می‌شود. در ادامه وارد کلکتور شماره ۲ شده و پس از دریافت انرژی جذب شده توسط کلکتورها از طریق ورودی بالای مخزن وارد مخزن می‌شود. با تکرار این سیکل دمای آب درون مخزن بالا رفته و در اثر تبادل حرارتی بین آب و محفظه‌های حاوی ماده تغییر فاز دهنده، دمای این مواد به تدریج افزایش یافته و انرژی جذب شده توسط کلکتورها در آنها ذخیره می‌شود. تا قبل از رسیدن دمای ماده تغییر فازدهنده به دمای ذوب، انرژی ذخیره شده به صورت گرمای محسوس بوده و با شروع فرایند ذوب، ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان خواهد بود. انرژی ذخیره شده در مخزن از طریق مدار بازیافت حرارت برای گرمایش گلخانه در شب مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این صورت که شب هنگام با فعال‌سازی مدار بازیافت حرارت، آب گرم از پایین‌ترین قسمت مخزن به وسیله پمپ مکش شده و با دبی ۰/۰۵ لیتر بر ثانیه وارد مبدل حرارتی(لوله مسی) می‌شود و پس از کاهش دما به علت تبادل حرارتی لوله مسی با خاک و محیط داخلی گلخانه به مخزن برمی‌گردد. انرژی ذخیره شده در پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فاز دهنده با تکرار این سیکل صرف گرمایش گلخانه در شب می‌شود. آزمایش‌ها و داده‌برداری‌ها در نیمه اول اسفند ماه ۱۳۹۳ در سایت خورشیدی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول به صورت شبانه‌روزی انجام گرفته است.

٤- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در گلخانه و میزان کارایی سیستم گرمایشی به کار گرفته شده پرداخته می‌شود. تغییرات دمایی لایه‌های خاک در عمق‌های مختلف و تغییرات دمایی داخل گلخانه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در تمام مدت داده‌برداری مدار ذخیره انرژی از ساعت ۸:۳۰ صبح و مدار گرمایش گلخانه از ساعت ۷:۴۵ شب فعال شده‌اند.

۴- ۱- بررسی تغییرات دمایی خاک گلخانه

به منظور بررسی تأثیر سیستم گرمایشی طراحی شده بر تغییرات دمایی خاک گلخانه، از ۴ سنسور دمایی در لایه‌های مختلف خاک (از نظر عمقی) استفاده شده است. شکل ۸ برای حالت با سیستم گرمایشی و شکل ۹ برای حالت بدون سیستم گرمایشی رسم شده است. نمودارها به صورت ۱۲ ساعته و از ساعت ۷ شب تا ۷ صبح رسم شده‌اند، به عنوان مثال ساعت ۱۳ روی نمودار معادل ساعت ۱ شب است. همان طور که مشاهده می‌شود برای حالت بدون سیستم گرمایشی تغییرات دمایی خاک گلخانه در تمامی عمق‌ها کاملاً سیر نزولی داشته و در ساعت۷ صبح (قبل از طلوع خورشید) به کمترین

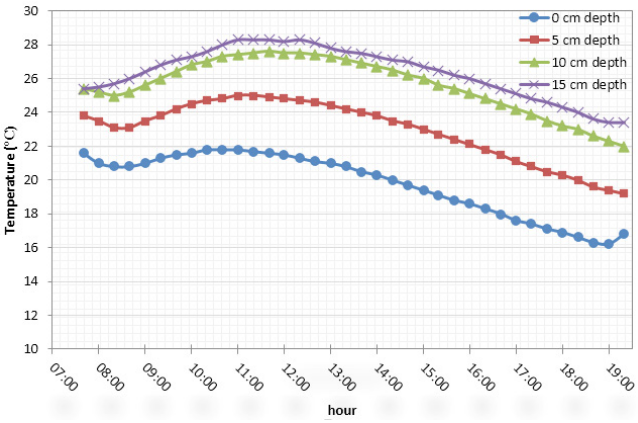

Fig. 8. Temperature variations in various heights of soil of the greenhouse with heating system

شکل ۸: تغییرات دما در ارتفاعات مختلف خاک گلخانه با سیستم گرمایشی

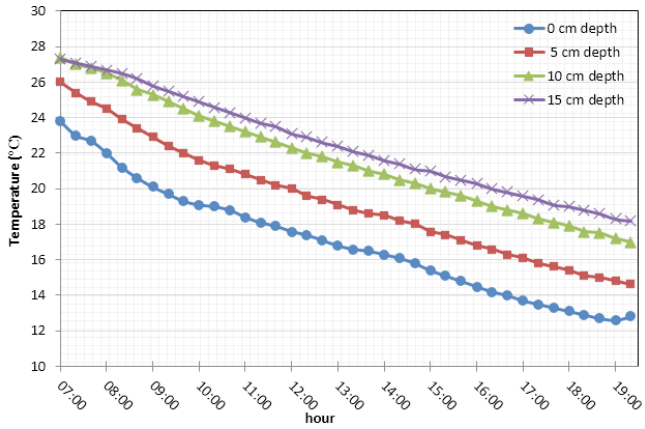

Fig. 9. Temperature variations in various heights of soil of the greenhouse without heating system

شکل ۹: تغییرات دما در ارتفاعات مختلف خاک گلخانه بدون سیستم گرمایشی

مقادیر دمایی خود رسیده‌اند. از ساعت ۷ شب تا ساعت ۷ صبح تقریباً ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دما در همه ارتفاعات مشاهده می‌شود. برای حالت با سیستم گرمایشی تقریباً تا ساعت ۱۲ شب به دلیل تزریق انرژی ذخیره شده درون مواد تغییر فاز دهنده، در همه لایه‌های خاک دماها دارای سیر صعودی بوده و بعد از ساعت ۱۲ شب به دلیل دشارژ شدن سیستم ذخیره انرژی، سیر نزولی دماها آغاز شده است و در ساعت ۷ صبح تمامی لایه‌های خاک به کمینه دمای خود رسیده‌اند. در حالت با سیستم گرمایشی کاهش دما در شب برای سطح خاک، عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متر به ترتیب ۶، ۵، ۳ و ۲/۵ درجه سانتی‌گراد است. در لایه‌های پایینی خاک روند کاهش دما کمتر است زیرا سطح بیرونی خاک در معرض انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی است. با افزایش عمق خاک به دلیل کاهش یا عدم وجود جابه‌جایی طبیعی و همچنین افزایش مقاومت حرارتی خاک، از روند کاهش دما کاسته می‌شود.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه‌ای برای تغییرات دمایی سطح خاک و عمق ۱۰ سانتی‌متر، برای دو حالت با سیستم گرمایشی و بدون سیستم گرمایشی صورت گرفته است. از شکل ۱۰ دریافت می‌شود که دمای سطح خاک در حالت با سیستم گرمایشی در همه‌ی ساعات شب (بعد از فعال نمودن سیستم گرمایشی) تقریبا ۴ درجه سانتی‌گراد از حالت بدون سیستم گرمایشی بیشتر است. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که دمای خاک در عمق ۱۰ سانتی متر برای حالت با سیستم گرمایش در ساعات مختلف شب ۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد از حالت بدون سیستم گرمایش بیشتر است. این دو نمودار به صورت آشکار تأثیر انرژی ذخیره شده را در بالا نگه داشتن دمای خاک بستر گلخانه برای رشد مناسب محصول نشان می‌دهند.

۴- ۲- تغییرات دمایی فضای گلخانه

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تغییرات دمایی گلخانه بدون سیستم گرمایشی برای دو شب مختلف نشان داده شده است. طبق شکل ۱۳ در شب اول نوسانات دمایی محیط بیشتر بوده و اختلاف چند دهم درجه سانتی گراد بین دمای گلخانه و محیط مشاهده می‌شود، کمینه دمای گلخانه در شب

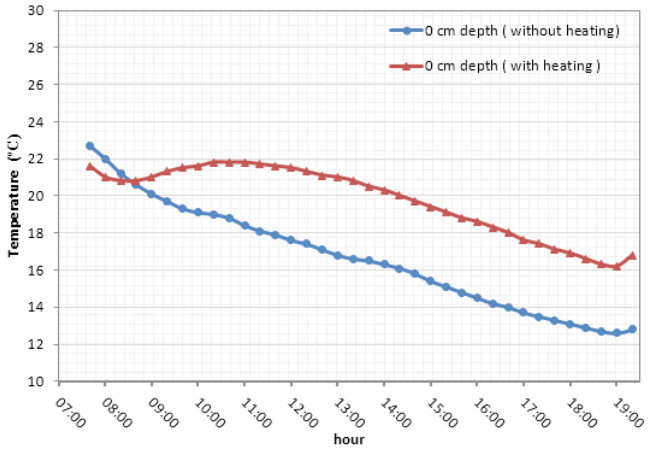

Fig. 10. The comparison temperature of surface of soil in two sequential night with and without heating system

شکل ۱۰: مقایسه دمای سطح خاک در دو شب متوالی با و بدون سیستم گرمایش

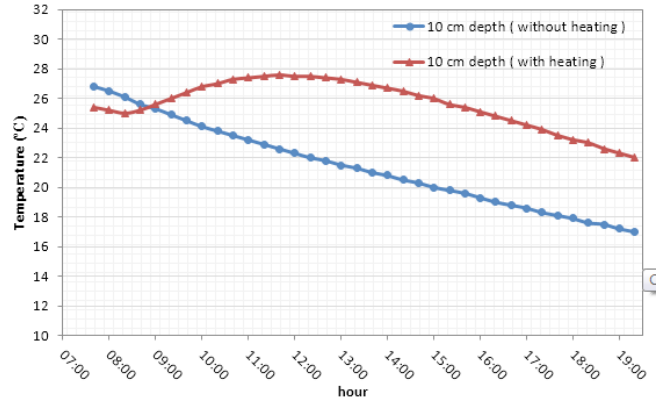

Fig. 11. The comparison temperature of 10 cm depth of soil in two sequential night with and without heating system

شکل ۱۱: مقایسه دمای عمق خاک ۱۰ سانتی متر در دو شب متوالی با و بدون سیستم گرمایش

اول ۵/۸ درجه سانتی‌گراد است. چنانچه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در شب دوم نوسانات دمایی محیط کمتر بوده و کمینه دمای شبانه نیز ۶/۲ درجه سانتی‌گراد است. برای هر دو شب دمای گلخانه تقریباً با دمای محیط یکسان است.

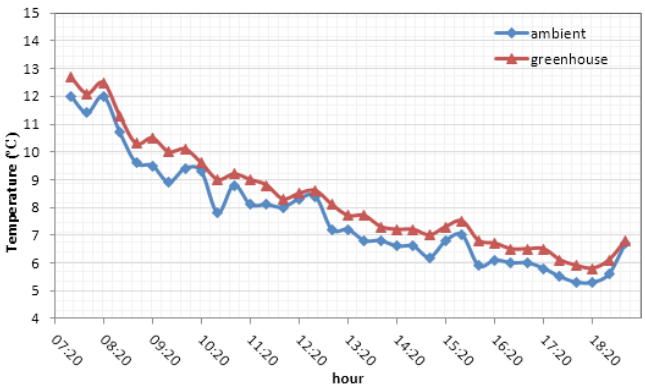

Fig. 12. The temperature variations of internal space of greenhouse without heating system (first night)

شکل ۱۲: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه بدون سیستم گرمایشی(شب اول)

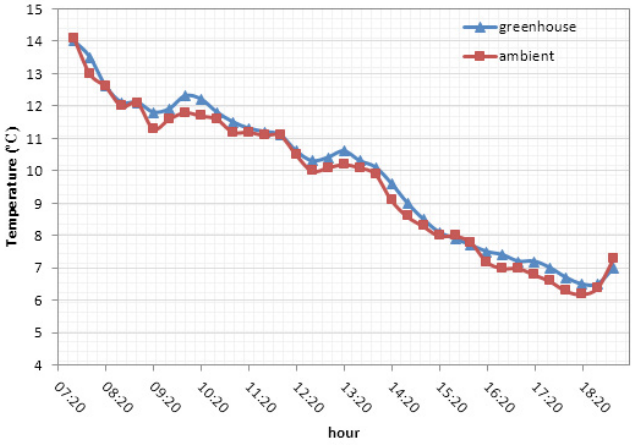

Fig. 13. The temperature variations of internal space of greenhouse without heating system (second night)

شکل ۱۳: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه بدون سیستم گرمایشی(شب دوم)

در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ تغییرات دمایی گلخانه مجهز به سیستم گرمایشی برای ۴ شب آورده شده است. همان‌طور در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، کمینه دمای محیط در شب اول ۵/۴ سانتی‌گراد بوده و در ساعت ۵:۴۰ رخ داده است. در حالی که در همین زمان دمای متوسط گلخانه ۹/۳ درجه سانتی‌گراد بوده و ۴ درجه اختلاف دما با محیط حاصل شده است. در تمام ساعات شب اختلاف دمای ۴ تا ۵ درجه‌ای به کمک سیستم گرمایشی به کار گرفته شده و انرژی ذخیره شده در ماده تغییر فاز دهنده حاصل شده است. در شب دوم مطابق شکل ۱۵ اختلاف دمای ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گرادی در تمام ساعات شب مشاهده می‌شود. در این شب کمینه دمای محیط ۶/۱ درجه سانتی‌گراد بوده و کمینه دمای گلخانه ۹ درجه سانتی‌گراد است. در شب‌های سوم و چهارم آزمایش نیز مطابق شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب اختلاف دماهای ۳ و ۵ درجه سانتی‌گرادی قابل مشاهده است. با توجه به نمودارها و اعداد و ارقام ارائه شده فوق به روشنی می‌توان تأثیر مثبت سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به واسطه‌ی مواد تغییر فاز دهنده را برای بالا نگه داشتن دمای داخل گلخانه در تمام ساعات شب دریافت. در جدول ۳ کمینه دماهای شبانه گلخانه و محیط و همچنین متوسط دماهای شبانه گلخانه و محیط آورده شده است. در شب‌هایی که گلخانه مجهز به سیستم گرمایشی بوده، کمینه دمای شبانه حدود ۳ درجه سانتی‌گراد از شب‌های بدون گرمایش بیشتر است. مشاهده می‌شود که در حالت مجهز به سیستم گرمایشی حدود ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش برای متوسط دمای شبانه حاصل گردیده است.

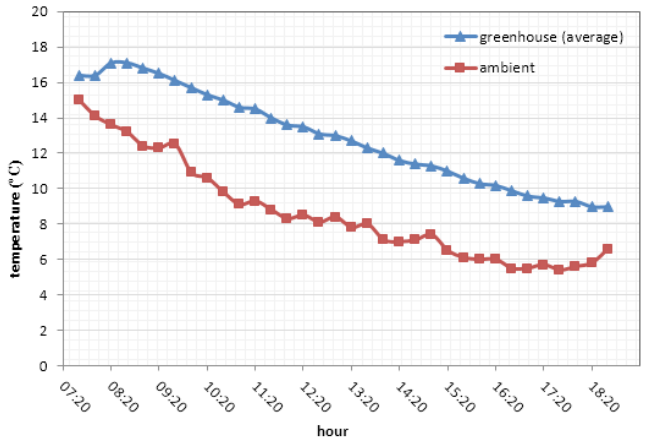

Fig. 14. The temperature variations of internal space of greenhouse with heating system (first night)

شکل ۱٤: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه با سیستم گرمایشی در شب اول

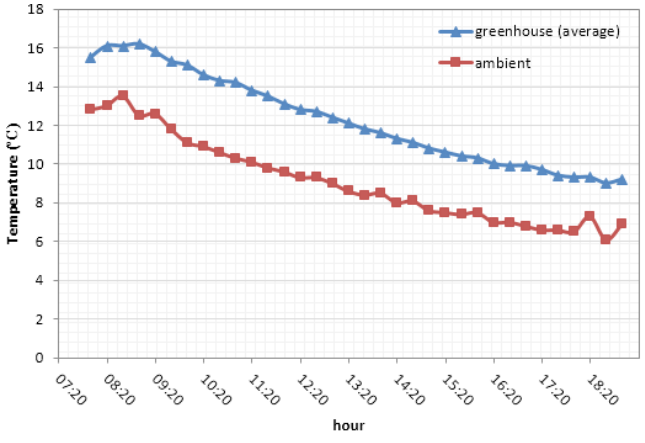

Fig. 15. The temperature variations of internal space of greenhouse with heating system (second night)

شکل ۱۵: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه با سیستم گرمایشی در شب دوم

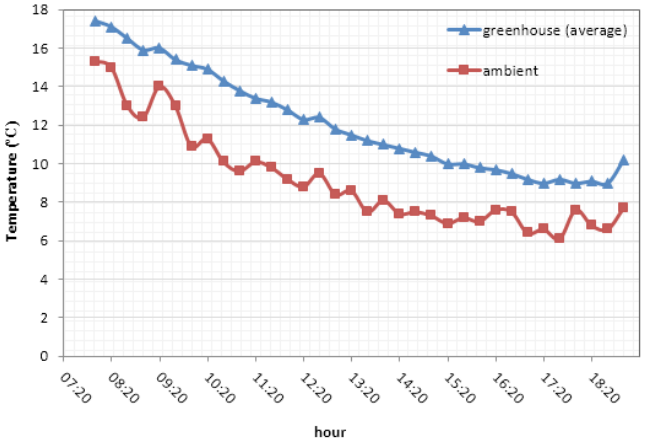

Fig. 16. The temperature variations of internal space of greenhouse with heating system (third night)

شکل ۱۶: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه با سیستم گرمایشی در شب سوم

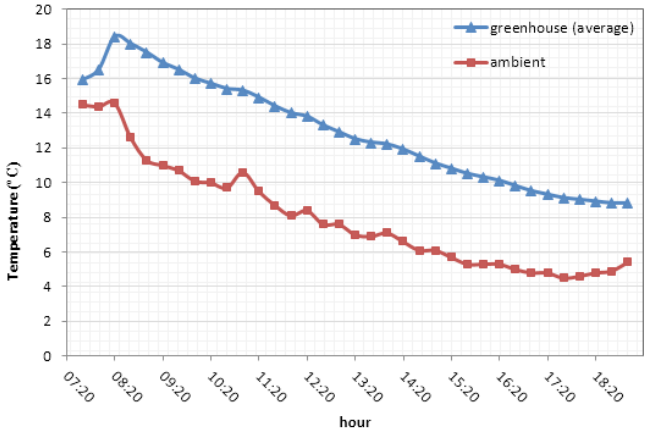

Fig. 17. The temperature variations of internal space of greenhouse with heating system (forth night)

شکل ۱۷: تغییرات دمایی فضای داخل گلخانه با سیستم گرمایشی در شب چهارم

جدول ۳: کمینه و میانگین دماها برای گلخانه و محیط

Table 3. The minimum and average of temperatures for greenhouse and surrounding

وضعیت گلخانه	کمینه دمای محیط*	کمینه دمای گلخانه*	میانگین دمای محیط*	میانگین دمای گلخانه*
بدون گرمایش	۶/۲	۶/۴	۹/۱	۹/۳
بدون گرمایش	۵/۳	۵/۸	۷/۷	۸/۲
با گرمایش	۵/۴	۹	۸/۶	۱۲/۸
با گرمایش	۶/۱	۹	۹	۱۲/۳
با گرمایش	۶/۱	۹	۹/۱	۱۲/۱
با گرمایش	۴/۵	۸/۸	۷/۹	۱۲/۸

* بر حسب درجه سانتی‌گراد

۵- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی میزان تأثیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده برای ذخیره انرژی در گلخانه، تغییرات دمایی خاک بستر گلخانه، فضای داخل گلخانه و محیط آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام گرفته به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

- در حالتی که گلخانه بدون سیستم گرمایشی بوده دمای گلخانه در شب تقریباً با دمای محیط یکسان است.
- در ساعات ابتدایی به علت اختلاف دمای زیاد مخزن و گلخانه، نرخ انتقال حرارت نسبت به ساعات انتهایی شب بیشتر بوده و دمای مخزن با سرعت بیشتری کاهش پیدا می‌کند.
- در حالتی که گلخانه بدون سیستم گرمایشی بوده دمای خاک بستر گلخانه در لایه‌های مختلف با نرخ تقریباً یکسانی کاهش می‌یابد، در حالی‌که در حالت با سیستم گرمایشی نرخ تغییرات دمایی در ارتفاعات مختلف متفاوت بوده و در لایه‌های پایینی خاک تغییرات کمتری مشاهده می‌شود.
- در حالت بدون گرمایش از ساعت ۷ شب تا ۷ صبح تقریبا ۱۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دما در همه لایه‌های خاک مشاهده می‌شود. برای حالت با سیستم گرمایشی مقدار کاهش دما در شب برای سطح خاک،عمق ۵ ، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۶، ۵، ۳ و۲/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.
- در همه ساعات شب و در همه شب‌های مورد آزمایش با کمک سیستم گرمایشی به کار گرفته شده اختلاف دمای حداقل ۳ درجه سانتی‌گراد با دمای محیط حاصل شده است، در برخی از شب‌ها اختلاف دمای محیط اطراف و گلخانه به ۵ درجه سانتی‌گراد نیز رسیده است.
- در شب‌هایی که گلخانه مجهز به سیستم گرمایشی بوده کمینه دمای شبانه حدود ۳ درجه سانتی‌گراد از شب‌های بدون گرمایش بیشتر می‌باشد.
- حدود ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش برای متوسط دمای شبانه حاصل شده است.
- بیش از ۵۰ درصد از نیاز گرمایشی گلخانه تأمین شده است.

فهرست علائم

a	ضریب جرم ماده
C	گرمای ویژه، (J/kgK)
m	جرم، (kg)
Q	حرارت ذخیره شده، (J)
T	دما، (ºC)
Δh	گرمای ذوب، (J/kg)

زیرنویس

a	متوسط
f	نهایی
i	اولیه
l	مایع
m	جرم
p	فشار
r	واکنش
s	جامد

بالانویس

*	شرایط مرجع

منابع

[1] V. P. Sethi, S.K. Sharma, Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse application. *solar energy*, (2008) 832-859.

[2] A. V. V. T. Sharma, C.R. Chen, D. Buddhi. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 13 (2009) 318-345.

[3] T. a. N. Takakura, A solar greenhouse with phase change energy storage and a microcomputer control system. *Acta Hort*. (energy in protected cultivation) 115 (1981) 583-590.

[4] B. K. Huang, M. Toksoy, Y. Cengel, Transient response of latent heat storage in greenhouse solar system. *Solar energy,* 37(4) (1986) 279-292.

[5] A. a. B. Baile, *Phase change material for heat storage in greenhouse*. In REUR technical series I-Greenhouse Heating With Solar Energy, (1986) 139-142.

[6] A. Bascetincelik, Y. Demirel, H. Paksoy, *Greenhouse heating with solar energy stored by phase change material*, 15thNational Agricultural Mechanisation Congress, Turkish, (1994).

[7] B. Huseyin, D. Aydin, Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collector in greenhouse heating. *solar energy,* 83 (2009) 2109-2119.

[8] F. Berroug, E.K. Lakhal, M. El Omari, M. Faraji, H. El Qarani, Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Building,* 43 (2011) 3027-3035.

[9] B. Salwa, K. Sami, S. Safa, L. Mariem, F. Abdelhamid, Improvement of the greenhouse climate using a solar air heater with latent storage energy. *ENERGY,* 64 (2014) 663-672.

[10] L. Mariem, B. Salwa, K. Sami, F. Abdelhamid, Conditioning of the tunnel greenhouse in the north of the Tunisia using a calcium chloride hexahydrate integrated in polypropylene heat exchanger. *Applied Thermal Engineering,* 68 (2014) 62-68.

[11] V. P. Sethi, On the selection of shape and orientatin of a greenhouse : Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy,* 83 (2009) 21-38.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. R. Assari, A. Alipoor, R. Nasiri, Experimental Investigation of Using Phase Change Materials in Heating System of a Solar Greenhouse, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 327-336.

DOI: 10.22060/mej.2016.684