

## طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه گرمایش خورشیدی با عدسی فرسnel خطی برای گلخانه

داود مؤمنی<sup>۱</sup>، احمد بناکار<sup>۲</sup>، برات قبادیان<sup>۲</sup>، سعید مینایی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۴/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۸)

## چکیده

کشت‌های گلخانه‌ای به دلیل ماهیت تولید خارج از فصل، یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده انرژی در بخش کشاورزی می‌باشند که منبع عمده تأمین‌کننده انرژی آنها، سوخت‌های فسیلی است. با توجه به معایب مصرف سوخت‌های فسیلی و قوانین بازدارنده مصرف آن در سال‌های آینده، بایستی در خصوص جایگزینی تدریجی آنها با انرژی‌های تجدیدپذیر مطالعات لازم صورت گیرد. در این تحقیق، یک سامانه گرمایش خورشیدی مجهز به متمرکزکننده از نوع عدسی فرسnel خطی با قابلیت تنظیم برای کل مناطق ایران، در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شد. بدین منظور، در ابتدا نیاز گرمایشی یک واحد گلخانه‌خوار محاسبه شده و با توجه به آن، سامانه گرمایش خورشیدی و سیستم ذخیره حرارت برای تأمین گرمای مورد نیاز داخل گلخانه طراحی و ساخته شد. به منظور ذخیره انرژی بیشتر، از مخزن عایق‌بندی شده با عایق الاستومریک و لوله‌های مسی حاوی پارافین داخل مخزن استفاده شد. سپس، عملکرد سامانه در سه محدوده دمایی ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه سلسیوس پایش گردید. بررسی روند تغییرات دمای آب مخزن نشان داد که میانگین کاهش دما در مخزن با دمای اولیه بیشتر نسبت به مخزن با دمای کمتر، سریع‌تر است. ولی با حجم و عایق‌بندی مناسب و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، بخصوص در محدوده ذوب پارافین، دما در مخزن ثابت‌تر باقی مانده و روند سرد شدن آن کندتر شد. لذا، سامانه گرمایش خورشیدی و مخزن ذخیره حرارت با حجم و عایق‌بندی مناسب می‌تواند در گرمایش گلخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، سیستم ذخیره حرارت، مواد تغییر فاز دهنده

## مقدمه

نظیر هزینه تولید و کمیت محصول نیز توجه کرد. یکی از پارامترهایی که برای تولید محصول کافی در گلخانه بایستی کنترل شود، دمای مطلوب گیاه است که برای هر گیاه مشخص شده است. لذا، برای آن که گلخانه دمای مطلوب داشته باشد باید با همان سرعتی که گرما از دست می‌دهد فضای آن را گرم نمود (۵ و ۸). مصرف عمده انرژی در گلخانه‌های ایران صرف گرمایش گلخانه می‌گردد که اغلب با استفاده از سوخت‌های فسیلی است (۷ و ۱۲). از طرف دیگر، ترازنامه انرژی ایران نشان می‌دهد که مصرف سوخت‌های فسیلی در کشور از

شروع کشت‌های گلخانه‌ای در ایران از حدود سه دهه پیش شروع شده و با سرعت در حال رشد است. محصولاتمانند خیار، گوجه‌فرنگی، فلفل، توت‌فرنگی، سبزی‌ها، نشا و گل‌های زینتی در گلخانه‌های ایران تولید می‌شوند (۲، ۱۰ و ۱۱). کشت محصولات گلخانه‌ای تقریباً در هر جا مقدور است، چون هر جایی که شرایط محیطی مساعد نباشد می‌توان شرایط مطلوب را به صورت کنترل شده برای رشد گیاه فراهم نمود. با این وجود، برای احداث گلخانه تجاری، بایستی به عوامل اقتصادی

۱. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۲. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ah\_banakar@modares.ac.ir

طول روز و کمترین تلفات انرژی از گلخانه در طول شب صورت می‌گیرد. در گلخانه‌های دسته دوم که گلخانه‌های فعال (Active) نامیده می‌شوند، با استفاده از جمع‌کننده‌ها و انتقال سیال گرم شده، گلخانه گرم می‌شود. در گلخانه‌های نوع سوم، با سلول‌های فتوولتائیک، تابش‌های خورشیدی به انرژی الکتریکی تبدیل شده و از آن در گلخانه استفاده می‌شود (۲۴) و (۳۲).

استفاده از خاصیت گرمای نهان مواد، به علت توانایی آن در ظرفیت ذخیره سازی بیشتر انرژی و ویژگی آن در ذخیره سازی گرما در دمای ثابت در حین تغییر فاز مواد، در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱۹ و ۳۴). تغییر فاز می‌تواند به صورت جامد-جامد، جامد-مایع و برعکس، جامد-گاز و برعکس و یا مایع-گاز و برعکس باشد. تاکنون استفاده از بیش از ۲۰۰ نوع ماده تغییرفاز دهنده در مقالات گزارش شده است که برای استفاده از آنها، علاوه بر خواص ترمودینامیک، فیزیکی و شیمیایی، قیمت و در دسترس بودن نیز باید در نظر گرفته شود. از جمله این خواص می‌توان به داشتن مواردی مانند نقطه ذوب مناسب، گرمای نهان کافی در فاز انتقال، انتقال حرارت خوب، دانسیته زیاد، تغییر حجم کم و فشار بخار کم در زمان تغییرفاز، نداشتن حالت خیلی سرد (Super cooling)، نرخ تبلور کافی، پایداری شیمیایی، سازگاری با مواد دیگر، غیرسمی بودن، آتش‌زا نبودن، در دسترس بودن و قیمت مناسب اشاره کرد (۳۳). یکی از مواد تغییرفاز دهنده، پارافین است که یک هیدروکربن اشباع شده با فرمول  $C_{n+2}H_{2n+2}$  می‌باشد. با توجه به خواص خوبی مانند غیرسمی بودن، سازگاری با اکثر فلزات، سهولت کاربرد، نداشتن حالت خیلی سرد، تغییر حجم کم، تبلور خوب و عدم تمایل به واکنش شیمیایی که در پارافین گرانوله وجود دارد، استفاده از آن به عنوان ماده تغییرفاز دهنده مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. تنها ایراد وارده به آن، خاصیت اشتعال‌پذیری است که بایستی مد نظر قرار داده شود (۲۱ و ۳۱). جوریناک و عبدالخالق (۲۵ و ۲۶) در سال‌های ۱۹۷۸ و

اواخر پاییز رو به فزونی می‌گذارد (۳). این نکته باعث می‌شود تا اوج مصرف در گلخانه با اوج مصرف در کشور برهم منطبق گردد. از طرف دیگر، مسائل زیست‌محیطی مصرف سوخت‌های فسیلی، قوانین و پروتکل‌های بازدارنده، محدود بودن منابع و عمر ذخایر سوخت‌های فسیلی و گران شدن سوخت باعث شده تا ضرورت توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از گذشته اهمیت یابد.

یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است. انرژی خورشیدی با وجود محاسنی مانند پاک بودن و گستردگی در سراسر دنیا، محدودیت‌هایی نیز دارد. مواردی مانند غیر دائمی بودن، رقیق بودن، نیاز به فناوری خاص و گران بودن از جمله این موارد است. با توجه به این که در ایران به طور متوسط ۵/۵ کیلووات ساعت انرژی خورشیدی در هر متر مربع در روز بر سطح زمین می‌تابد و ۳۰۰ روز آفتابی در ۹۰٪ خاک کشور وجود دارد، ایران یکی از کشورهای با پتانسیل مناسب در زمینه انرژی خورشیدی است (۱). تلاش برای استفاده از انرژی خورشیدی توسط محققین سابقه زیادی دارد. فیلسوف یونانی ارشمیدس، یکی از اولین افرادی بوده که از انرژی خورشیدی در ۲۰۹ سال قبل از میلاد استفاده کرد. او با استفاده از متمرکز کننده‌های برنزی، ناوگان دریایی رومی‌ها را آتش زد.

بعد از پیدا کردن راه کارهای استفاده از انرژی باد، زغال سنگ و سوخت‌های فسیلی و به موازات آن کاهش قیمت نفت در اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، دانشمندان انرژی خورشیدی را رها کردند تا در قرن بیستم تحقیقات در سطح تحقیقات ارشمیدس باقی ماند (۲۳). بعد از بحران نفت در سال ۱۹۷۳، محققین تلاش کردند تا راه حل‌های راحت و ساده‌ای را برای استفاده از انرژی خورشیدی در گلخانه پیدا کنند. به طور کلی، از انرژی خورشیدی در گلخانه‌ها به سه صورت استفاده می‌گردد. در نوع اول که به گلخانه‌های غیرفعال (Passive) نیز معروف هستند، با استفاده از انرژی گرمایی حاصل از تابش‌های خورشیدی، گلخانه گرم می‌شود. در این گلخانه‌ها، شیوه ساخت به گونه‌ای است که بیشترین استفاده از تابش‌های خورشیدی در

مهمت (۳۰) استفاده از مواد تغییرفاز دهنده را در یک سیستم گرمایش خورشیدی صفحه تخت برای گرمایش هوا مورد مطالعه قرار داد. او بدین نتیجه رسید که برای گرمایش مؤثرتر بایستی از لوله‌های کوتاه‌تر و باریکتر استفاده نمود.

آرکار و مدود (۱۶) یک سیستم تهویه خورشیدی را طراحی کردند که در آن مواد تغییرفاز دهنده استفاده شده بود. آنها استفاده از پارافین ریخته شده داخل کپسول‌های فلزی را مناسب دانستند.

نتایج تمام تحقیقات گذشته در خصوص کاربرد مواد تغییرفاز دهنده در سیستم‌های ذخیره انرژی در گلخانه نشان از کاربردی و مؤثر بودن این مواد، بخصوص در تغییر فاز جامد به مایع، دارد. ولی فرایند پیچیده تهیه بعضی از آنها از یک طرف و قیمت زیاد آنها از طرف دیگر باعث شده تا کاربرد صنعتی آنها به صورت محدود انجام گیرد (۱۹).

با توجه به وضعیت مناسب تابش خورشید در ایران، مطالعه در خصوص استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین بخشی از نیاز گرمایش گلخانه‌ها ضروری است. در این تحقیق، برای اولین بار، یک سامانه گرمایش خورشیدی مجهز به عدسی فرسnel خطی و سیستم ذخیره حرارت برای تأمین گرمای مورد نیاز داخل گلخانه طراحی، ساخته و ارزیابی شد. با توجه به این که زمان استفاده از سامانه طراحی شده، ماه‌های سرد سال است، لذا استفاده حداکثری از تابش خورشید بسیار اهمیت دارد. بدین منظور، از متمرکزکننده خورشیدی استفاده شد، که علاوه بر جذب بیشتر تابش‌های خورشید، نسبت به جمع‌کننده‌های صفحه تخت، تلفات حرارتی کمتری نیز دارد. به منظور جذب حداکثر تابش، واحد ردیاب خورشیدی نیز برای سامانه طراحی و ساخته شد تا در طول روز، متمرکزکننده را در راستای خورشید نگاه دارد. ردیاب به‌گونه‌ای ساخته شده که در پایان ردیابی روزانه، به صورت خودکار به وضعیت صبحگاهی برگردد (۱۳). همچنین، به عنوان ماده تغییرفاز دهنده از پارافین ریخته شده در داخل لوله‌های مسی استفاده شد که پس از بستن سر و ته لوله‌ها، داخل مخزن عایق‌بندی شده قرار داده شد.

۱۹۷۹ اثرهای استفاده از مواد تغییرفاز دهنده بر عملکرد سیستم‌های گرمایش خورشیدی را بررسی کردند. مهم‌ترین یافته آنها این بود که نقطه ذوب مواد تغییرفاز دهنده اثر معنی‌داری بر بازده سیستم دارد. لذا نقطه ذوب مواد تغییرفاز دهنده مهم‌تر از مقدار گرمای نهان ذوب است.

کرن و آلدریچ (۲۸) از  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  با نقطه ذوب ۵۴ درجه سلسیوس و گرمای نهان ذوب ۱۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم به عنوان ماده تغییرفاز دهنده در مخازن ذخیره انرژی استفاده کردند. آنها یک مخزن را در داخل و یک مخزن را در خارج از یک واحد گلخانه تحقیقاتی به مساحت ۳۶ متر مربع و مجهز به سامانه گرمایش خورشیدی صفحه تخت ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در حالی که ۸۰-۹۰ درصد انرژی ذخیره شده در مخزن بیرونی آزاد می‌شود، در مخزن داخلی تنها ۶۰-۸۰ صورت می‌گیرد. بنابراین، انتخاب ماده تغییرفاز دهنده از نظر دمای کاری پراهمیت است.

کای‌گوسوز (۲۷) یک سری مطالعات تئوری و عملی برای تعیین بازده مواد تغییرفاز دهنده و دمای خروجی آب در سیستم‌های گرمایش خورشیدی انجام داد. این سامانه شامل جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، مخزن ذخیره انرژی، تبادله حرارتی از نوع آب-هوا، سیستم گرمایش کمکی برقی، پمپ و تجهیزات اندازه‌گیری بود. او در مخزن ذخیره از آب و ماده تغییرفاز دهنده با نقطه ذوب ۲۵ درجه سلسیوس استفاده کرد و بدین نتیجه رسید که سیستم ذخیره انرژی برای اقلیم‌های معتدل بسیار ضروری است.

فتح (۲۲) در یک سیستم گرمایش خورشیدی صفحه تخت، از سامانه ذخیره انرژی استفاده کرد. ماده تغییرفاز دهنده در داخل لوله‌های فلزی ریخته شده و به عنوان قسمت جاذب حرارت در جمع‌کننده قرار داده شد. پارافین با نقطه ذوب ۵۰ درجه سلسیوس و گرمای نهان ذوب ۱۹۰ کیلوژول بر کیلوگرم به عنوان ماده تغییرفاز دهنده استفاده شد. او گزارش کرد که با این روش، بازده سیستم به حدود ۶۳٪ می‌رسد. در حالی که در حالت معمولی، بازده سیستم ۳۸٪ بود.

جدول ۱. اطلاعات محل انجام تحقیق

ابعاد گلخانه (دهانه × طول × ارتفاع نهایی)	۴ × ۸ × ۵ متر
نوع پوشش گلخانه	پلی کربنات دوجداره
عرض جغرافیایی	۳۵° ۴۴'
طول جغرافیایی	۵۱° ۱۰'
ارتفاع از سطح دریا (m)	۱۳۶۹
کمینه دما (°C)	-۱۲/۲
بیشینه سرعت باد (km/h)	۹۰
فاکتور سرعت باد. (°C kcal/m <sup>۲</sup> )	۱۶/۱

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق، نیاز گرمایشی یک واحد گلخانه، در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، با استفاده از استاندارد انجمن گلخانه‌سازان و بر اساس اطلاعات هواشناسی بلندمدت و نیاز گرمایشی خیار و با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد (جدول ۱).

$$L = L_{\text{cover}} + L_{\text{frame}} + L_{\text{wind}} \quad [1]$$

که  $L$  تلفات کل (kcal/h)،  $L_{\text{cover}}$  تلفات پوشش (kcal/h)،  $L_{\text{frame}}$  تلفات سازه (kcal/h) و  $L_{\text{wind}}$  تلفات باد (kcal/h) است. هر یک از به صورت زیر محاسبه گردیدند:

تلفات پوشش: این تلفات میزان گرمای از دست رفته از سطح پوشش گلخانه را نشان می‌دهد و با سطح و نوع پوشش گلخانه و اختلاف دمای بیرون و داخل گلخانه متناسب است. برای به دست آوردن آن از فرمول ۲ استفاده شد:

$$L_{\text{cover}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{inside}} - T_{\text{outside}}) \quad [2]$$

که  $U$  ضریب انتقال (kcal/h.m<sup>۲</sup>.°C)،  $A$  مساحت پوشش (m<sup>۲</sup>)،  $T_{\text{inside}}$  دمای مورد نظر از گلخانه برای رشد گیاه (°C) و  $T_{\text{outside}}$  کمینه دمای خارج از گلخانه (°C) است.

در ساخت گلخانه، علاوه بر اجزای نگهدارنده پوشش، اجزای دیگری مانند ستون، ناودانی و میله‌های نگهدارنده افقی نیز وجود دارند. بنابراین، نیاز است که تلفات آنها نیز لحاظ گردد. با توجه به این که مقدار تلفات سازه بسته به جنس سازه متفاوت است، برای محاسبه آن، در ابتدا مقدار تلفات به دست آمده از فرمول ۲ محاسبه شده و مقدار آن در

فاکتور ساخت،  $c$ ، که به جنس سازه مرتبط است، ضرب می‌شود (۱۵):

$$L_{\text{frame}} = cL \quad [3]$$

هر چه سرعت وزش باد در محل احداث گلخانه بیشتر باشد، تلفات حرارتی نیز بیشتر می‌شود. به همین دلیل، در جاهایی که سرعت باد از ۲۴ km/h زیادتر شود، با استفاده از ضرایب اصلاحی ارائه شده در منابع، مقدار تلفات به دست می‌آید. در این تحقیق نیز در ابتدا با فرمول ۴ مقدار تلفات به دست آمد و با استفاده از ضریب تصحیح (جدول ۱)، مقدار تلفات باد محاسبه شد:

$$L_{\text{wind}} = 0.018NV(T_{\text{inside}} - T_{\text{outside}}) \quad [4]$$

که  $N$  تعداد تبادلات هوای داخل گلخانه بر ساعت و  $V$  حجم داخل گلخانه (m<sup>۳</sup>) است.

## طراحی و ساخت سامانه گرمایش خورشیدی

برای یکسری از کاربردها به دمایی بیشتر از دمای ایجاد شده توسط جمع‌کننده‌های صفحه تخت نیاز است. به همین دلیل، متمرکزکننده‌های خورشیدی ساخته شدند. این متمرکزکننده‌ها یا به صورت انعکاسی (بازتاب دهنده نور) و یا انکساری (شکننده نور) هستند که هر یک از آنها می‌توانند به فرم استوانه‌ای برای متمرکز کردن روی یک خط یا به فرم دایره‌ای برای متمرکز کردن روی یک نقطه باشند. به علت کاهش سطح جذب‌کننده، اتلاف حرارتی در آنها کمتر است. در

جدول ۲. مشخصات عدسی فرسنل به کار رفته در پروژه

وزن (kg)	ابعاد (mm)	ضخامت (mm)	گام شیار (mm)	فاصله کانونی (mm)
۱/۳	۱۰۰۰×۱۰۰۰	۳	۰/۵	۱۵۰۰



شکل ۱. طرحواره متمرکزکننده خورشیدی با عدسی فرسنل خطی

متمرکزکننده‌ها، برخلاف جمع‌کننده‌های صفحه تخت، فقط از تابش مستقیم استفاده می‌شود. بنابراین، به سیستم ردیاب خورشیدی نیاز دارند (۲۰). یکی از انواع متمرکزکننده‌های ساخته شده، عدسی فرسنل (Fresnel lens) است که در سال ۱۸۲۲ توسط آگوستین جین فرسنل (Augustin-Jean Fresnel) ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی (۱۷۸۸-۱۸۲۷) ساخته شد. عدسی فرسنل یک قطعه نوری است که مواد اضافی بین دو سطح به وسیله شیارهای هم‌مرکز روی سطح آن جایگزین شده است. شیب هر یک از شیارهای تخت معادل انحنای موجود روی عدسی‌های معمولی می‌باشد که هر یک از این شیارها خود به صورت یک منشور عمل می‌نمایند. عدسی‌های فرسنل برحسب شکل شیارها به دو دسته خطی و دایره‌ای تقسیم می‌شوند. عدسی فرسنل خطی متشکل از شیارهای خطی موازی است که تمرکز را روی یک خط انجام می‌دهد. اما در نوع دایره‌ای شیارها به صورت دایره‌هایی هم‌مرکز هستند و کانون حاصل از این نوع به صورت یک نقطه می‌باشد (۱۸). با توجه به این که در ساخت عدسی فرسنل مواد کمتری نسبت به عدسی‌های معمولی به کار رفته است، باریکتر و سبک‌تر از عدسی‌های معمولی است. در نتیجه، هزینه‌های شاسی و ردیاب در آنها کمتر است. چون توانایی جداسازی تابش‌های مستقیم و غیر مستقیم در آنها وجود دارد، در قیاس با عدسی‌های معمولی هم‌اندازه، دمای بیشتری ایجاد می‌کنند. در گذشته، ساخت این عدسی‌ها با دشواری همراه بود. اما امروزه با پیشرفت سامانه‌های ساخت رایانه‌ای و مواد پلیمری، ساخت این محصول آسانتر شده است و از آن در ساخت چگالنده‌ها (Condenser)، موازی‌سازها (Collimators)، نمایشگرها و ذره‌بین‌ها استفاده می‌گردد (۲۹). با توجه به نبود فناوری ساخت این عدسی در ایران، با سه شرکت آلمانی، ایتالیایی و چینی مذاکراتی جهت ساخت عدسی مورد نظر صورت گرفت که در نهایت شرکت چینی ChampionTechnology Co. ساخت عدسی با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ را بر عهده گرفت. پس از انتقال عدسی به ایران، برای آن شاسی مناسب طراحی و ساخته شد (شکل‌های ۱ و ۲).

متمرکزکننده‌ها، برخلاف جمع‌کننده‌های صفحه تخت، فقط از تابش مستقیم استفاده می‌شود. بنابراین، به سیستم ردیاب خورشیدی نیاز دارند (۲۰). یکی از انواع متمرکزکننده‌های ساخته شده، عدسی فرسنل (Fresnel lens) است که در سال ۱۸۲۲ توسط آگوستین جین فرسنل (Augustin-Jean Fresnel) ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی (۱۷۸۸-۱۸۲۷) ساخته شد. عدسی فرسنل یک قطعه نوری است که مواد اضافی بین دو سطح به وسیله شیارهای هم‌مرکز روی سطح آن جایگزین شده است. شیب هر یک از شیارهای تخت معادل انحنای موجود روی عدسی‌های معمولی می‌باشد که هر یک از این شیارها خود به صورت یک منشور عمل می‌نمایند. عدسی‌های فرسنل برحسب شکل شیارها به دو دسته خطی و دایره‌ای تقسیم می‌شوند. عدسی فرسنل خطی متشکل از شیارهای خطی موازی است که تمرکز را روی یک خط انجام می‌دهد. اما در نوع دایره‌ای شیارها به صورت دایره‌هایی هم‌مرکز هستند و کانون حاصل از این نوع به صورت یک نقطه می‌باشد (۱۸). با توجه به این که در ساخت عدسی فرسنل مواد



شکل ۲. متمرکزکننده خورشیدی با عدسی فرسنل خطی

که  $T_s^+$ ,  $T_s$  دماهای مخزن در یک ساعت متوالی ( $^{\circ}\text{C}$ )،  $\Delta t$  بازه زمانی ( $h$ )،  $m$  جرم آب ( $kg$ )،  $C_p$  ظرفیت گرمایی آب ( $\text{kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )،  $Q_u$  آهنگ اضافه نمودن انرژی توسط متمرکزکننده ( $\text{kcal/h}$ )،  $L_s$  آهنگ برداشت انرژی توسط مصرف کننده ( $\text{kcal/h}$ )،  $U$  ضریب هدایت مخزن ( $\text{kcal/m}^2 \cdot h \cdot ^{\circ}\text{C}$ )،  $A_s$  سطح خارجی مخزن ( $m^2$ ) و  $\Delta T = T_s - T_0$  اختلاف دمای محیط و داخل مخزن ذخیره آب ( $^{\circ}\text{C}$ ) است.

به منظور کاهش تلفات انرژی، بایستی دیواره مخزن ذخیره عایق‌بندی گردد. برای محاسبه ضخامت بهینه عایق از فرمول‌های ۶ و ۷ استفاده شد (۹). مجموع مقاومت‌های حرارتی بین سطح خارجی لوله و سیال محیط  $R_t$  برابر است با:

$$R_t = R_{\text{cond}} + R_{\text{conv}} = \frac{1}{[2\pi K] \times \ln(ro/ri)} + \frac{1}{(2\pi ro h)} + L_{\text{frame}} + L_{\text{wind}} \quad [6]$$

که  $Subscript$  مقاومت هدایت حرارتی عایق ( $m \cdot ^{\circ}\text{C/W}$ )،  $K$  ضریب هدایت حرارتی عایق ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )،  $ro$  و  $ri$  شعاع خارجی و داخلی عایق ( $m$ )،  $Subscript$  مقاومت حرارتی بین سطح خارجی مخزن و هوای محیط ( $m \cdot ^{\circ}\text{C/W}$ ) و  $h$  ضریب انتقال حرارت ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) است.

مقدار  $R_t$  زمانی کمینه می‌شود که  $dR_t/dro=0$  باشد. در این حالت، انتقال حرارت از لوله به محیط بیشینه است.

افزایش بازده متمرکزکننده‌ها نیاز است که زاویه آنها به صورت دوره‌ای در هر منطقه تنظیم گردد (۱۷). لذا، در طراحی و ساخت سامانه، این نکته مورد توجه قرار گرفت و دستگاه به صورتی طراحی و ساخته شد تا علاوه بر قابلیت تنظیم دوره‌ای، برای کل عرض جغرافیایی ایران نیز قابل استفاده باشد (شکل‌های ۱ و ۲).

برای ردیابی تابش‌های خورشیدی نیز یک سیستم ردیاب روی شاسی قرار گرفت تا در طول روز سامانه را بچرخاند. سامانه ردیاب طوری طراحی شد که با غروب خورشید در پایان روز، جمع‌کننده به طور خودکار در وضعیت صبحگاهی قرار می‌گرفت. با تمرکز تابش‌های خورشیدی روی لوله جاذب، آب داخل آن گرم می‌شد. مقدار گرم شدن آب بسته به شدت تابش خورشیدی و دبی آب عبوری متفاوت بود. آب گرم شده در لوله جاذب به مخزن آب گرم منتقل می‌شد.

برای محاسبه میزان تلفات حرارتی مخزن ذخیره حرارت در شب از فرمول ۵ استفاده شد. همان گونه که فرمول نشان می‌دهد تغییرات دمای مخزن به آهنگ اضافه شدن انرژی توسط متمرکزکننده و برداشت انرژی توسط مصرف کننده و تلفات بستگی دارد (۶ و ۲۰).

$$T_s^+ = T_s + [Q_u - L_s - (UA_0)_s (T_s - T_0)] \cdot \Delta t / (m \cdot C_p)_s \quad [5]$$

جدول ۳. میزان تلفات گرمایی محاسبه شده در گلخانه در سردترین شب زمستانی

ساعت	کمینه دما (سلسیوس)	تلفات پوشش (kcal)	تلفات سازه (kcal)	تلفات باد (kcal)	مجموع تلفات (kcal)	مجموع تلفات (kJ)
۱۸-۱۹	۴	۱۷۰۰	۱۸۷	۱۸۰	۲۰۶۷	۸۶۵۴
۱۹-۲۰	۲	۲۰۰۰	۲۲۰	۲۱۱	۲۴۳۱	۱۰۱۷۸
۲۰-۲۱	۰	۲۳۰۶	۲۵۴	۲۴۳	۲۸۰۳	۱۱۷۳۶
۲۱-۲۲	-۲	۲۶۱۳	۲۸۷	۲۷۴	۳۱۷۴	۱۳۲۸۹
۲۲-۲۳	-۴	۲۹۲۱	۳۲۱	۳۰۵	۳۵۴۷	۱۴۸۵۱
۲۳-۲۴	-۶	۳۲۲۸	۳۵۵	۳۳۷	۳۹۲۰	۱۶۴۱۲
۰-۱	-۸	۳۵۳۶	۳۸۹	۳۷۳	۴۲۹۸	۱۷۹۹۵
۱-۲	-۱۰	۳۸۴۳	۴۲۳	۴۰۴	۴۶۷۰	۱۹۵۵۲
۲-۳	-۱۲	۴۱۵۰	۴۵۷	۴۳۶	۵۰۴۳	۲۱۱۱۴
۳-۴	-۱۲	۴۱۵۰	۴۵۷	۴۳۶	۵۰۴۳	۲۱۱۱۴
۴-۵	-۱۲	۴۱۵۰	۴۵۷	۴۳۶	۵۰۴۳	۲۱۱۱۴
۵-۶	-۱۲	۴۱۵۰	۴۵۷	۴۳۶	۵۰۴۳	۲۱۱۱۴
۶-۷	-۶	۳۲۲۸	۳۵۵	۳۳۷	۳۹۲۰	۱۶۴۱۲

بستن سر و ته لوله‌ها، داخل مخزن عایق‌بندی شده قرار داده شد. پس از ارزیابی اولیه مخزن عایق‌بندی شده در آزمایشگاه و به دست آوردن نتایج مطلوب در نگهداشت دمای آب، روند تغییرات دمای آب داخل مخزن عایق‌کاری شده به همراه پارافین در سه محدوده دمایی ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه سلسیوس پایش گردید. بدین منظور، از یک دماسنج چهار کاناله مجهز به سیستم ثبت داده‌ها از نوع ST-۳۸۹۱G استفاده شد.

### نتایج و بحث

برای محاسبه مقدار حرارت تلف شده، پس از محاسبه مقدار سطوح خارجی گلخانه، از آمار بلندمدت هواشناسی منطقه چیتگر و اطلاعات فیزیولوژیک خیار، میانگین دمای روزانه و شبانه ۲۰ و ۱۵ درجه سلسیوس، استفاده شد و با استفاده از فرمول‌های ۱ تا ۴، مقدار گرمای مورد نیاز برای گرم نگه داشتن گلخانه در طول یک فصل محاسبه گردید. به منظور جلوگیری از حجیم شدن مقاله، تنها محاسبات مربوط به سردترین شب زمستانی در جدول ۳ آورده شده است.

اطلاعات جدول ۳ نشان می‌دهد که برای گرم نگهداشتن

$$dR_t / dr_o = 1 / (2\pi K) \times 1 / r_o - 1 / (2\pi r_o^2 h) = 0 \quad [7]$$

$$r_o = K / h \quad [8]$$

در شعاع  $r_o = r_c$  حرارت تلف شده از لوله بیشینه خواهد شد. بنابراین،  $r_c$  را شعاع بحرانی می‌نامند. می‌بایست شعاع بحرانی کوچک نگه داشته شود تا با کاربرد عایق، افت انرژی حرارتی کمتر گردد. این کار با انتخاب عایق با ضریب هدایت حرارتی کوچک‌تر امکان پذیر می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های خوب عایق الاستومریک مانند پایداری بسیار زیاد، ضریب انتقال حرارت بسیار ناچیز  $0.032 \text{ w/m} \cdot \text{k}$ ، دارا بودن ساختار سلولی بسته در نتیجه جذب آب بسیار کم، عدم ایجاد خوردگی در فضای بین عایق و لوله، دامنه عملکرد دمایی بسیار مناسب (۲۰۰ تا ۸۰- درجه سلسیوس)، داشتن استاندارد مناسب در مقابل حریق، قابلیت نصب و اجرای آسان و راحت در ضخامت‌های متفاوت، نداشتن مواد سمی و مخرب محیط‌زیست، عدم ایجاد حساسیت و مشکلات تنفسی برای انسان (۴) این عایق به عنوان عایق مخزن استفاده شد.

در این تحقیق، پارافین با نقطه ذوب  $45-55 \text{ }^\circ\text{C}$  و ظرفیت گرمای نهان  $200 \text{ kJ/kg}$  داخل لوله‌های مسی ریخته و پس از

جدول ۳. دمای محاسبه شده مخزن ذخیره آب گرم (بدون عایق) در سردترین شب زمستانی

ساعت	کمینه دمای محیط آزاد	T+	T+	T+
۱۸-۱۹	۴	۶۵/۰	۵۰/۰	۳۵/۰
۱۹-۲۰	۲	۶۲/۳	۴۷/۳	۳۲/۳
۲۰-۲۱	۰	۵۹/۱	۴۴/۱	۲۹/۲
۲۱-۲۲	-۲	۵۵/۵	۴۰/۵	۲۵/۱
۲۲-۲۳	-۴	۵۱/۴	۳۶/۴	۲۱/۱
۲۳-۲۴	-۶	۴۶/۸	۳۱/۸	۱۶/۴
۰-۱	-۸	۴۱/۷	۲۶/۷	-
۱-۲	-۱۰	۳۶/۱	۲۱/۱	-
۲-۳	-۱۲	۳۰/۱	۱۵	-
۳-۴	-۱۲	۲۳/۶	-	-
۴-۵	-۱۲	۱۷/۱	-	-

جدول ۴. حجم تقریبی آب مورد نیاز در هر ساعت برای گرم کردن گلخانه

دمای آب گرم شده توسط عدسی فرسنگل خطی (°C)	حداکثر حجم تقریبی آب مورد نیاز در هر ساعت برای گرم کردن گلخانه (l)
۳۵	۲۵۰
۴۰	۲۰۰
۴۵	۱۶۵
۵۰	۱۴۵
۵۵	۱۲۵
۶۰	۱۱۵
۶۵	۱۰۰

محدوده آرام باشد. پس از محاسبه مقدار گرمای مورد نیاز (جدول ۳)، حجم تقریبی آب به دست آمد (جدول ۴). به عنوان نمونه، برای تأمین ۵۰۰۰ کیلوکالری گرما در دمای شبانه ۱۵ درجه سلسیوس با آب ۶۵ درجه، به ۱۰۰ لیتر آب نیاز است. از طرف دیگر، مخزن نبایستی خیلی بلند ساخته شود، چرا که علاوه بر افزایش هزینه‌های ساخت و عایق‌بندی، مقدار تلفات حرارتی از آن نیز افزایش می‌یابد. لذا، با استفاده از نتایج محاسبات ارائه شده در جداول ۳ و ۴ و لحاظ کردن نکات ذکر شده، مخزن به صورت استوانه‌ای با قطر ۰/۷ و ارتفاع ۱ متر ساخته شد.

### ضخامت عایق مخزن

با توجه به این که مخزن دارای سطح منحنی شکل می‌باشد، در ابتدا شعاع بحرانی عایق محاسبه شد. با استفاده از فرمول ۷، مقدار شعاع بحرانی ۰/۴۸ متر به دست آمد. با توجه به این که مقدار شعاع بحرانی بسیار کمتر از مقدار شعاع مخزن می‌باشد، بنابراین افزودن هر مقدار عایق به مخزن باعث کاهش تلفات حرارتی می‌شود. در این تحقیق، از عایقی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر استفاده گردید.

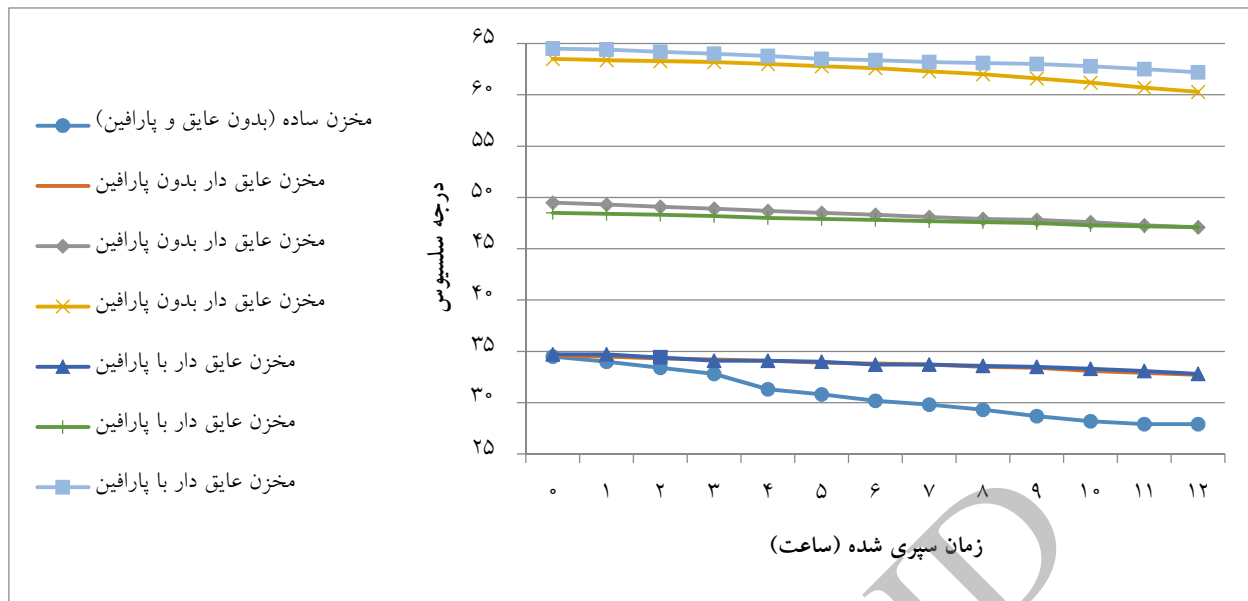
برای محاسبه میزان تلفات حرارتی مخزن ذخیره حرارت در شب نیز از فرمول ۵ استفاده شد و با فرض دماهای مختلف

دمای گلخانه در ۱۵ درجه سلسیوس در سردترین شب زمستان که دمای هوا به ۱۲- درجه سلسیوس می‌رسد، حدود ۵۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت گرما نیاز است. با توجه به تغییر ساعات روزهای آفتابی در ماه‌های مختلف، دمای لوله جاذب متفاوت خواهد بود که با توجه به آن، حجم تقریبی آب برای تأمین این مقدار حرارت به دست آمد (جدول ۴).

### حجم مخزن

ابعاد مخزن بایستی به گونه‌ای باشد که علاوه بر تأمین حجم مورد نیاز آب برای ذخیره انرژی حرارتی، جریان در آن در





شکل ۳. روند تغییرات دمای آب در مخزن ذخیره در حالت‌های مختلف

آوردن نتایج مطلوب در نگهداشت دمای آب، مخزن عایق‌کاری شده با آب در سه دمای ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درجه سلسیوس پُر و روند تغییرات دمای آب داخل آن در محیط با دمای ۱۷ درجه سلسیوس از ساعت ۱۱ قبل از ظهر تا ساعت ۱۱ قبل از ظهر روز بعد بررسی شد. برای همخوانی با محاسبات تئوری، فقط داده‌های ساعت ۱۸ تا ۵ صبح روز بعد در جدول ۶ گزارش گردیده است. همان گونه که در جدول ۶ دیده می‌شود، عایق‌بندی مناسب مخزن ذخیره آب گرم می‌تواند آب با دمای مناسب را برای گرمایش شبانه گلخانه تأمین کند.

بررسی روند تغییرات دمای آب مخازن با دماهای مختلف نشان داد که میانگین آهنگ کاهش دما در مخزن با دمای اولیه ۶۳/۵ درجه سلسیوس در شرایط آزمایش شده ۰/۲۶ درجه در ساعت بوده که نسبت به مخزن با دمای ۳۴/۶ سلسیوس با ۰/۱۶ درجه در ساعت، سریع‌تر سرد شده است. ولی با حجم و عایق‌بندی مناسب، آب گرم کافی برای استفاده در سیستم گرمایش در دسترس بوده است (شکل ۳). همچنین، بررسی اثر وجود پارافین بر روند تغییرات دما در مخازن در سه حالت قابل بررسی است. حالت اول دمای ۶۳/۵ درجه سلسیوس که بیشتر از نقطه ذوب پارافین است. حالت دوم

جدول ۶. دمای محاسبه شده مخزن ذخیره آب گرم (عایق‌بندی شده) در سردترین شب زمستانی

ساعت	T+	T+	T+
۱۸-۱۹	۶۳/۵	۴۹/۵	۳۴/۶
۱۹-۲۰	۶۳/۴	۴۹/۳	۳۴/۵
۲۰-۲۱	۶۳/۳	۴۹/۱	۳۴/۳
۲۱-۲۲	۶۳/۲	۴۸/۹	۳۴/۲
۲۲-۲۳	۶۳/۰	۴۸/۷	۳۴/۱
۲۳-۲۴	۶۲/۸	۴۸/۵	۳۳/۹
۰-۱	۶۲/۶	۴۸/۳	۳۳/۸
۱-۲	۶۲/۳	۴۸/۱	۳۳/۷
۲-۳	۶۲/۰	۴۷/۹	۳۳/۵
۳-۴	۶۱/۶	۴۷/۸	۳۳/۴
۴-۵	۶۱/۲	۴۷/۶	۳۳/۱

برای مخزن آب گرم، دمای مخزن به صورت ساعتی برای کل دوره رشد محاسبه شد که تنها نتایج به دست آمده برای سردترین شب زمستانی در جدول ۴ آورده شده است.

### ارزیابی مخزن

پس از ارزیابی اولیه مخزن و عایق در آزمایشگاه و به دست

### نتیجه‌گیری

با انتخاب حجم مناسب مخزن ذخیره و عایق بندی آن، می‌توان انرژی خورشیدی را در طول روز و با استفاده از سیستم متمرکز کننده خورشیدی به صورت آب گرم در دماهای مختلف، بسته به میزان تابش، ذخیره کرده و در شب به جای مصرف سوخت‌های فسیلی استفاده نمود.

### سپاسگزاری

از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت که از انجام این تحقیق حمایت کردند، قدردانی می‌گردد.

دمای ۵۰ درجه سلسیوس که در محدوده دمای ذوب پارافین است و حالت سوم دمای ۳۵ درجه سلسیوس که کمتر از دمای ذوب پارافین است. نتایج نشان داد که وجود پارافین در دو حالت اول و سوم هیچ تأثیر مثبتی بر جلوگیری از کاهش دما نداشته است. در حالی که وجود پارافین در حالت دوم باعث شده روند سرد شدن مخزن بسیار کند گردد و انتقال گرما به صورت هم‌دما صورت گیرد. این نکته با یافته‌های سایر محققین همخوانی دارد (۲۵ و ۲۶). لذا، با انتخاب حجم مناسب مخزن و عایق‌بندی آن، می‌توان انرژی خورشیدی را در طول روز با استفاده از سیستم متمرکزکننده خورشیدی به صورت آب گرم در دماهای مختلف، بسته به میزان تابش، ذخیره کرده و در شب به جای مصرف سوخت‌های فسیلی استفاده نمود.

### منابع مورد استفاده

۱. بی‌نام. ۱۳۹۰. نشریه انرژی خورشیدی شماره ۲. انتشارات سازمان انرژی‌های نو ایران.
۲. بی‌نام. ۱۳۹۳. آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی ایران. [www.maj.ir](http://www.maj.ir)
۳. بی‌نام. ۱۳۹۳. ترازنامه انرژی جمهوری اسلامی ایران. معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی وزارت نیرو.
۴. بی‌نام. ۱۳۹۳. دانش‌نامه عایق ایران. [www.irima.ir](http://www.irima.ir)
۵. حسندخت، م. ۱۳۸۴. مدیریت گلخانه، تکنولوژی تولید محصولات گلخانه‌ای. انتشارات مرز دانش، ۳۲۰ ص.
۶. خلجی اسدی، م.، ف. تریان اصفهانی و ا. ریاحی. ۱۳۸۹. مهندسی فرایندهای حرارتی خورشیدی. انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
۷. شرافتی، ک. ۱۳۸۸. بررسی شاخص‌های مصرف انرژی تولید خیار در گلخانه‌های تهران. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
۸. عباسپور فرد، ح. و م. ع. ابراهیمی نیک. ۱۳۸۷. مهندسی گلخانه. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
۹. فعال، س.، ت. توکلی هاشجین و ب. قبادیان. ۱۳۹۲. طراحی، ساخت و ارزیابی مخزن ذخیره گرمای سامانه تولید همزمان قدرت و حرارت (MCHP) در مقیاس میکرو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
۱۰. مؤمنی، د. ۱۳۸۴. سیستم‌های مناسب در طراحی و ساخت گلخانه‌های سبزی و صیفی. مجموعه مقالات اولین همایش ملی محصولات گلخانه‌ای، اردیبهشت، ساری.
۱۱. مؤمنی، د. ۱۳۸۵. سیستم‌های مناسب در طراحی و ساخت گلخانه‌های گل و گیاهان زینتی. سمپوزیوم ملی راهکارهای بهبود تولید و توسعه صادرات گل و گیاهان زینتی، مرکز ملی تحقیقات گل و گیاهان زینتی ایران، محلات، استان مرکزی.
۱۲. مؤمنی، د. ۱۳۹۰. بررسی شاخص‌های مصرف انرژی تولید خیار در گلخانه‌های منطقه جیرفت و کهنوج. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
۱۳. مؤمنی، د.، ا. بناکار، ب. قبادیان، س. مینایی و م. منتظری. ۱۳۹۳. طراحی و ساخت ردیاب خورشیدی برای سامانه گرمایش خورشیدی مجهز به لنز فرسnel خطی. سومین کنگره هیدروپونیک و تولیدات گلخانه‌ای، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۱۸ تا ۲۰ شهریور، کرج.

14. Anonymous. 2013. Long term meteorological information of Iran. Available on: [www.irimo.ir](http://www.irimo.ir)

15. Anonymous. 2014. The US national greenhouse manufacturers' association standard for heat loss in greenhouse structure. Available on: [www.NGMA.com](http://www.NGMA.com)

16. Arkar, C. and S. Medved. 2002. Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage. IEA, ECES IA Annex 17, advanced Thermal Energy Storage Techniques- Feasibility Studies and Demonstration Projects, 2nd Workshop, Ljubljana, Slovenia.
17. Bakirci, K. 2012. General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 16: 6149-6159.
18. Chemisana, D., D. Lamnatou and Y. Tripanagnostopoulos. 2012. Fresnel Solar Concentrators for Agriculture Applications. International Conference of Agricultural Engineering, CIGR, AgEng, 8-12 July, Valencia, Spain.
19. Chen, K., X. Yu, C. Tian and J. Wang. 2014. Preparation and characterization of form-stable paraffin/polyurethane composites as phase change materials for thermal energy storage. *Energ. Convers. Manage.* 77: 13-21.
20. Duffie, J. and W. Beckman. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th Ed., 936 p.
21. El-Kotb, M., A. El-Sharkawy, N.M. El-Chazly, N.M. Khattab and S. El-Deeb. 2006. Thermal characteristics of paraffin wax for solar energy storage. *Energ. Source., Part A: Recovery, Utilization, and Environ. Effects.* 28(12): 1113-1126.
22. Fath, H.E.S. 1995. Thermal performance of a simple design solar air heater with built-in thermal energy storage system. *Renew. Energ.* 6(8): 1033-1039.
23. Grafiadellis, I. and E. Traka-mavrona. 2011. Heating greenhouse with solar energy: New trends and developments. International Symposium on Advanced Technologies and Management Towards Sustainable Greenhouse Ecosystems, Greece.
24. Grafiadellis, M. and S. Kyritsis. 1980. Heating greenhouses with solar energy. *Acta Hort.* 115: 553-560.
25. Jurinak, J.J. and S.I. Abdel-Khalik. 1978. Properties optimization for phase-change energy storage in air-based solar heating systems. *Solar Energ.* 21: 377-383.
26. Jurinak, J.J. and S.I. Abdel-Khalik. 1979. Sizing phase-change energy storage units for air-based solar heating systems. *Solar Energ.* 22: 355-359.
27. Kaygusuz, K. 1995. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems. *Energ. Convers. Manage.* 36: 315-323.
28. Kern, M. and R.A. Aldrich. 1979. Phase change energy storage in a greenhouse solar heating system. Summer Meeting of ASAE and CSAE, June 24-27, University of Manitoba, Winnipeg.
29. Madhugiri, G.A. and S.R. Karale. 2012. High solar energy concentration with a Fresnel lens: A review. *Int. J. Modern Eng. Res.* 2(3): 1381-1385.
30. Mehmet, E. 2000. Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump. *Solar Energ.* 69(1): 15-25.
31. Murali, G., K. Mayilsamy and T.V. Arjunan. 2014. An experimental study of PCM-incorporated thermosyphon solar water heating system. *Int. J. Green Energ.* 12(9): 978-986.
32. Santamouris, M., A. Argiriou and M. Vallindras. 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar Energ.* 52(5): 371-378.
33. Sharma, A., V.V. Tyagi, C.R. Chen and D. Buddhi. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 13(2): 318-345.
34. Sharma, S.D. and K. Sagara. 2005. Latent heat storage materials and systems: A review. *Int. J. Green Energ.* 2(1): 1-56.