

## بررسی تجربی عملکرد سامانه‌ی گرمایش خورشیدی گلخانه مجهز به متمرکزکننده‌ی سهموی و جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت دو منظوره

محمد جعفری<sup>1</sup> - حمید مرتضی پور<sup>2\*</sup> - کاظم جعفری نیمی<sup>3</sup> - محمد مهدی مهارلوئی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1395/04/01

تاریخ پذیرش: 1395/06/24

### چکیده

در تحقیق حاضر، برای تأمین حرارت مورد نیاز گلخانه، یک سامانه‌ی گرمایش خورشیدی مجهز به متمرکزکننده‌ی سهموی خطی و جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت دو منظوره، پیشنهاد گردید. در این سامانه از یک مخزن برای ذخیره حرارت تولید شده استفاده شد. جریان سیال حامل حرارت در داخل متمرکزکننده به صورت اجباری و با استفاده از پمپ انجام گرفت. یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی در داخل گلخانه نصب گردید که در طول روز، وظیفه گردآوری تابش خورشید و ذخیره حرارت در مخزن و در شب نقش مبدل حرارتی برای انتقال حرارت ذخیره شده در سامانه‌ی گرمایش، به محیط گلخانه را داشت. ارزیابی سامانه‌ی پیشنهادی در سه سطح دبی سیال عبوری در متمرکزکننده (0/44، 0/75 و 1/5 لیتر بر دقیقه) و دو حالت با و بدون استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین بازده متمرکزکننده در بالاترین دبی سیال عبوری حدود 71 درصد به دست آمد. با بالا بردن دبی از 0/44 تا 1/5 لیتر بر دقیقه، به طور متوسط ذخیره حرارت در مخزن 32/14 درصد بهبود داشت. با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی، به طور متوسط 26/67 درصد و با بالا بردن دبی تا 1/5 لیتر بر دقیقه، 30 درصد در مصرف برق گرم‌کن کمکی، صرفه‌جویی گردید. در نهایت، بالاترین مقدار سهم خورشیدی سامانه پیشنهاد شده در تحقیق حاضر، 66 درصد بود که در بیشترین دبی سیال عبوری و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی، گرمایش گلخانه، متمرکزکننده‌ی خورشیدی

### مقدمه

بالا است و حدود 60-80٪ از کل هزینه‌های تولید را شامل می‌شود (Paksoy et al., 2010; Ozgener and Hepbasli, 2006). نتایج پژوهشی حاکی از آن بود که بیشترین سهم نهاده‌ها در کشت گلخانه‌ای مربوط به سوخت‌های فسیلی است در حالی که در کشت‌های مزرعه‌ای، سوخت پس از کود دومین نهاده پرمصرف می‌باشد (Taki et al., 2012). عوامل متفاوتی را برای انتخاب سامانه‌های گوناگون جهت گرم کردن گلخانه باید در نظر گرفت؛ که از آن جمله می‌توان به پوشش گلخانه، نوع کشت، محل گلخانه و شرایط آب و هوایی اشاره کرد. افزایش جذب پرتو خورشید، سبب کاهش تلفات حرارتی در آب و هوای سرد و افزایش بازده گلخانه‌ها می‌شود (Critten and Bailey, 2002; Santamouris et al., 1994; Sethi et al., 1986; Tiwari and Dhiman, 2013). به منظور کاهش مصرف انرژی در تولید محصول‌های گلخانه‌ای در شب، دو گلخانه مشابه یکی با پوشش شبانه و دیگری بدون پوشش شبانه، در مرکز تحقیقات و فن‌آوری‌های انرژی در تونس ساخته و نصب شد. نتایج تحقیق نشان داد که نرخ حرارت از دست رفته برای گلخانه با پوشش 24

محصول‌های گلخانه‌ای، پشتیبان غذایی در طول سال می‌باشند، از این رو صنعت گلخانه در حال توسعه است. در گلخانه عوامل رشد گیاه در طول دوره رشد قابل کنترل می‌باشد (Kissock and Eger, 2008; Jaber, 2002). هزینه‌های گرم کردن گلخانه در بسیاری از کشورهای دنیا به طور مثال در ترکیه بسیار

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(\*) نویسنده مسئول: (Email: h.mortezapour@uk.ac.ir)

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

4- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

در شانگهای چین مورد ارزیابی قرار گرفت. مساحت گلخانه، مساحت جمع‌کننده‌های خورشیدی و مساحت محل ذخیره حرارت به ترتیب 2304، 500 و 4970 مترمربع بود، نتایج تحقیق بهره‌برداری 331/9 گیگاژول انرژی ذخیره شده در سال اول را برای گرمایش فضای داخل گلخانه نشان داد، همچنین این سامانه قادر است دمای داخل گلخانه را وقتی که دمای هوای بیرون 2- درجه سلسیوس است، در دمای 13 درجه سلسیوس حفظ کند (Xu et al., 2014b). بیشتر گلخانه‌های سنتی دارای تلفات حرارتی بالا و عدم ذخیره‌سازی گرما هستند، به همین خاطر در تابستان، برای جلوگیری از گرم شدن زیاد گلخانه به علت تابش بیش از حد خورشید در طول روز و در فصل زمستان به علت پایین آمدن درجه حرارت در طول شب، کشاورزان نیاز به مصرف فراوان سوخت‌های فسیلی، برای حفظ دمای گلخانه هستند. در این حالت انرژی خورشیدی نمی‌تواند به‌طور کارآمد استفاده شود. ذخیره‌سازی حرارت خورشیدی راهکاری مفید برای جلوگیری از مصرف سوخت بیشتر و همچنین بهره‌وری مؤثر از انرژی خورشید است (Benli and Durmuş, 2009a; Benli, 2011). طراحی سامانه‌ی گرمایش خورشیدی متشکل از یک جمع‌کننده مسطح، مخزن ذخیره‌ساز گرما و یک پمپ جهت گردش آب در سردترین فصل‌های سال تونس توسط نرم‌افزار TRNSYS، نشان داد که سامانه نمی‌تواند به‌طور کامل نیاز گرمایی یک گلخانه بزرگ را تولید کند، اما استفاده از آن، نیازهای حرارتی یک گلخانه کوچک را به‌سادگی پوشش می‌دهد. در واقع به‌کارگیری سامانه‌ی گرمایش برای گلخانه با مساحت 10 و 100 مترمربع به ترتیب در ماه دسامبر، 64/9 و 25 درصد و در ماه آوریل، 133/61 و 51/05 درصد از هزینه‌های اقتصادی را کاهش می‌دهد (Attar and Farhat, 2015).

جمع‌کننده‌هایی که به‌طور معمول در سامانه‌های گرمایش خورشیدی استفاده می‌شوند، از نوع تخت هستند که محدوده دمایی خروجی و بازده کاری آن‌ها به نسبت پایین است. در این راستا، استفاده از متمرکزکننده‌های خورشیدی می‌تواند ضمن بهبود بازده حرارتی، تا حدودی کاهش هزینه‌ها را در بر داشته باشد. در تحقیق حاضر، یک سامانه‌ی گرمایشی خورشیدی گلخانه مجهز به متمرکزکننده‌ی سهموی خطی (PTC<sup>2</sup>) و یک مخزن ذخیره‌ی حرارت، ارائه و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود بازده حرارتی سامانه‌ی مورد نظر، از یک جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی به‌صورت دومنظوره (به‌عنوان جمع‌کننده خورشیدی در روز و به‌عنوان مبدل حرارتی برای انتقال حرارت ذخیره شده در سامانه‌ی گرمایش به محیط گلخانه در طول شب) بهره گرفته شد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که گزارش‌های چندانی در خصوص استفاده از سامانه‌های مشابه برای گرم کردن گلخانه‌ها، در پژوهش‌های پیشین

درصد و بدون پوشش 61 درصد در شب می‌باشد (Kooli et al., 2015). استفاده از سامانه‌های گرمایشی مناسب با هزینه‌های پایین، امری حیاتی برای فراهم کردن شرایط بهینه در محیط داخلی گلخانه در ماه‌های سرد سال است. به‌جای سوخت‌های فسیلی، منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی زمین‌گرمایی (Ghosal and Tiwari, 2004)، انرژی خورشید و انرژی زیست‌توده (Chau et al., 2009) می‌تواند در یک سامانه گرمایش گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرند. در این راستا، استفاده از جمع‌کننده‌های انرژی خورشیدی<sup>1</sup>، برای گرم کردن گلخانه‌ها، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. دو نوع سامانه‌ی آبی و هوایی برای انتقال انرژی گرمایی خورشید به گلخانه ارائه شده است (Jakhar et al., 2015).

انرژی خورشیدی را می‌توان به‌صورت گرمایی، الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی ذخیره کرد (Bal et al., 2010). موادی که برای ذخیره‌سازی گرما به‌کار می‌روند عبارتند از: آب، مواد تغییر فاز دهنده<sup>2</sup>، سنگ، سامانه‌ی لوله‌های دفن شده در زیر خاک و غیره (Teitel et al., 1999; Ghosal and Tiwari, 2006). مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی، در ابتدا محلول‌هایی مانند  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ،  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  و پارافین بود (Benli and Durmuş, 2009). استفاده از 6000 کیلوگرم پارافین برای یک گلخانه در ترکیه به مساحت 180 مترمربع به‌منظور ذخیره حرارت نشان داد که مقدار گرمای ذخیره شده بین 0/65 تا 2/1 کیلووات است (Öztürk, 2005). گلخانه‌ای به مساحت 30 مترمربع و با استفاده از 300 کیلوگرم محلول تغییر فاز دهنده  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، توانست گرمای روزانه حدود 18 تا 23 درصد این گلخانه را ذخیره کند (Benli and Durmuş, 2009). استفاده از مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در تونس نشان داد که دمای گلخانه مجهز به سامانه ذخیره‌ساز گرما، 5 درجه سلسیوس بیشتر از یک گلخانه معمولی در شب می‌باشد، همچنین 31 درصد بازیافت حرارت توسط مواد ذخیره‌ساز گرما در شب گزارش شده است (Bouadila et al., 2014). فن‌آوری‌های گرمایش خورشیدی گلخانه با استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشید، داخل زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (Kooli et al., 2015). سامانه‌های حرارتی انرژی خورشیدی به‌تنهایی قادر به تأمین گرما برای ذخیره‌سازی در حجم زیاد می‌باشند. انرژی خورشیدی می‌تواند به‌صورت گرما در داخل زمین ذخیره شود و سپس مورد استفاده قرار گیرد (Esen and Yuksel, 2013). گلخانه‌ی مجهز به سامانه‌ی ذخیره‌ساز حرارت در داخل زمین به کمک جمع‌کننده‌های خورشیدی به‌کار گرفته شد، که این سامانه در تابستان حرارت را ذخیره و در زمستان مصرف می‌کند، این سامانه

1- Solar energy collectors  
2- Phase changed material

3- Parabolic trough solar concentrator

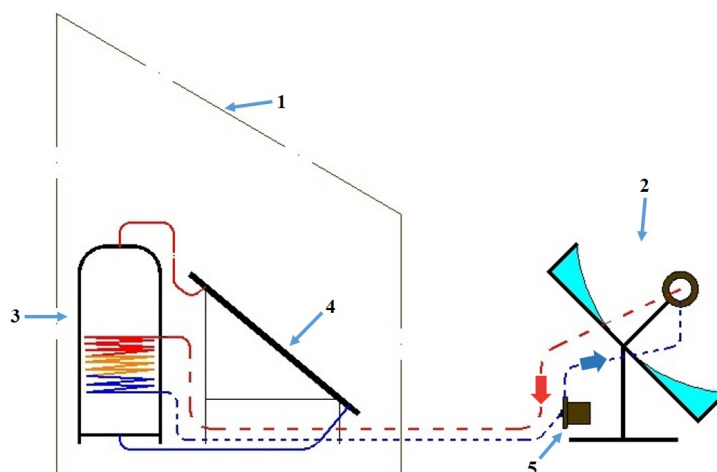
وجود ندارد.

تحقیق آب است) را گرم و با عبور آن از مبدل حرارتی داخل مخزن، موجب افزایش دمای آب ذخیره شده در مخزن می‌گردد. یک جمع‌کننده خورشیدی تخت بدون پوشش شیشه‌ای که برای دو منظور به مخزن متصل است، گرمای ذخیره شده را در طول شب با سرد شدن هوا، به محیط گلخانه می‌دهد. همچنین این جمع‌کننده، در طول روز با جذب نور خورشید، مانند نقش یک گردآورنده انرژی خورشیدی را دارد و سبب گرم‌تر شدن آب داخل مخزن ذخیره حرارت می‌گردد. لوله‌های پلاستیکی ورودی و خروجی متمرکزکننده، مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی به پوشش‌های عایق مجهز شده‌اند.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات سامانه‌ی گرمایش خورشیدی مورد نظر

طرح‌واره‌ای از سامانه گرمایش خورشیدی مورد نظر تحقیق حاضر در شکل 1 نشان داده شده است. این مجموعه شامل متمرکزکننده‌ی سهموی خطی، مخزن ذخیره‌ی آب گرم، جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت و پمپ آب می‌باشد. در طول روز متمرکزکننده خورشیدی با استفاده از توان تابشی خورشید، سیال حامل حرارت (که در این



**شکل 1- طرح‌واره‌ای از سامانه گرمایشی گلخانه:** 1- گلخانه یک‌طرفه، 2- متمرکزکننده سهموی خطی، 3- مخزن ذخیره حرارت، 4- جمع‌کننده خورشیدی تخت، 5- پمپ آب گرم

**Fig.1.** A schematic view of the components of the designed solar greenhouse heating system: 1- Lean-to greenhouse, 2- Parabolic trough solar concentrator, 3- Storage tank, 4- Flat plate solar collector, 5- Pump

لوله‌ها به‌طور فراوانی در ساختمان آب‌گرم‌کن‌های لوله‌خا موجود در بازار به‌کار می‌روند. ورودی و خروجی آب در دریافت‌کننده ساخته شده، در یک سمت قرار گرفته، به‌طوری‌که، ورود جریان آب به داخل دریافت‌کننده، از طریق یک لوله مسی به طول 1/66 متر و برگشت آب از اطراف این لوله در داخل دریافت‌کننده بود. یک پمپ گریز از مرکز (مدل UPS 15-60 ساخت شرکت GRUNDFOS کشور آلمان) با توان اسمی 90 وات برای به‌جریان در آوردن آب در داخل مجموعه سامانه گرمایش خورشیدی به‌کار گرفته شد.

### مشخصات مخزن ذخیره‌ی آب گرم

برای ذخیره‌ی آب‌گرم مورد نیاز، در این پژوهش از یک مخزن مخصوص آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، مدل T200 شرکت پلار در ایران، که قابلیت کار به‌صورت جریان اجباری و ترموسیفون داشت،

### مشخصات متمرکزکننده خورشیدی سهموی خطی

تصویر متمرکزکننده خورشیدی مورد استفاده در تحقیق، در شکل 2- الف نشان داده شده است. از یک ورق استیل براق (مدل 304 ساخت شرکت ماندگار استیل پارس در ایران) با ترکیب 8-10 درصد نیکل، 18-20 درصد کروم و حدود 80 درصد کربن و ضریب بازتاب 93 درصد، به طول 2 و عرض یک متر، به‌عنوان منعکس‌کننده در این سامانه استفاده گردید. منعکس‌کننده روی چهار ورق تفلون فشرده (هر یک به ضخامت 15 میلی‌متر)، که از قبل با استفاده از برش سی ان سی لیزر با دقت یک‌صدم میلی‌متر، به شکل سهمی مورد نظر آماده شده بودند، نصب گردید. دریافت‌کننده به‌کاررفته در سامانه خورشیدی، شامل یک لوله خا، با قطر لوله بیرونی 57/65 میلی‌متر و جنس شیشه و قطر لوله داخلی 44 میلی‌متر و جنس مس بود. انتخاب این لوله بر اساس دسترسی آسان به آن در بازار بود. این نوع

### مشخصات گرم‌کن کمکی

به‌منظور تأمین گرمای مورد نیاز گلخانه در زمانی که توان حرارتی سامانه‌ی گرمایش خورشیدی کافی نیست، از یک گرم‌کن الکتریکی کمکی استفاده گردید. بر اساس محاسبات اولیه‌ی انجام شده در تحقیق، بیشینه‌ی توان حرارتی مورد نیاز گلخانه در یک روز سرد زمستانی با دمای کمینه 20- درجه سلسیوس، حدود 1960 وات بود. لذا، با احتساب بازده گرم‌کن الکتریکی، در این تحقیق از یک گرم‌کن با 4 عدد المنت برقی 700 وات جریان متناوب و یک دمنده 50 وات با ولتاژ تغذیه 12 ولت مستقیم استفاده گردید. گرم‌کن در داخل گلخانه نصب گردید و سامانه‌ی کنترل دما، از طریق یک کنترل‌گر دو وضعیتی (روشن/خاموش) آن را کنترل می‌کرد.

### روش انجام آزمایش

به‌منظور ارزیابی سامانه‌ی گرمایش پیشنهادی، یک گلخانه با ساختار یک‌طرفه به طول 5 متر، عرض 2/16 متر با ارتفاع قسمت جلو گلخانه 1/5 متر و قسمت عقب 2/75 متر در آزمایشگاه انرژی خورشیدی بخش مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شد (موقعیت جغرافیایی گلخانه: 30°14'N، 57°06'E و ارتفاع از سطح دریا 1756 متر می‌باشد). شاسی گلخانه از قوطی‌های آهنی با سطح مقطع 4x4 سانتی‌متر ساخته شد که سطح بیرونی آن توسط ورق‌های پلی‌کربنات شفاف با ضخامت 10 میلی‌متر پوشیده شد. شکل 2-a، نحوه قرارگیری اجزای مختلف سامانه‌ی گرمایش خورشیدی و شکل 2-b، تصویری از فضای داخل گلخانه، مخزن ذخیره‌ی آب و جمع‌کننده‌ی خورشیدی را در حال انجام آزمایش نشان می‌دهد.

پس از ساخت و نصب اجزای مختلف سامانه‌ی گرمایشی مورد نظر در کنار گلخانه، آزمایش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد آن در بهمن و اسفند ماه سال 1394 انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل دبی آب عبوری از داخل سامانه متمرکزکننده خورشیدی در سه سطح (0/44، 0/75 و 1/5 لیتر بر دقیقه) و دو حالت با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی و بدون استفاده از آن در طول روز بود، که در سه تکرار و در 18 شبانه‌روز انجام شد. در آزمایش‌هایی که قرار بود از جمع‌کننده‌ی تخت استفاده نشود، در طول روز یک پوشش ضخیم بر روی سطح آن قرار می‌گرفت و مسیر جریان آب از داخل آن مسدود می‌گردید. در هر آزمایش دمای داخل گلخانه در سه سطح مختلف، دمای آب داخل مخزن در 5 عمق مختلف، دمای آب ورودی و خروجی از متمرکزکننده‌ی خورشیدی، دمای محیط، شدت تابش خورشید بر روی سطح متمرکزکننده و توان مصرفی گرم‌کن الکتریکی کمکی اندازه‌گیری شدند.

استفاده گردید. این مخزن، دارای ارتفاع 140 سانتی‌متر و قطر 63/69 سانتی‌متر به‌صورت دوجداره با حجم مخزن داخلی 200 لیتر و حجم جداره 25 لیتر بود که بخش داخلی برای ذخیره آب گرم و بخش بیرونی به‌عنوان مبدل حرارتی برای تبادل حرارت بین جریان آب داغ سامانه گرمایش خورشیدی و مخزن ذخیره آب گرم مورد استفاده قرار گرفت. جداره خارجی مخزن بیرونی با فوم پلی‌اورتان به ضخامت 5 سانتی‌متر به‌طور کامل عایق شده بود.

### مشخصات جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت

طراحی‌های انجام شده در این تحقیق به‌گونه‌ای بود که بخشی از حرارت مورد نیاز گلخانه، به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت انجام گیرد. برای این منظور، یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی مدل Optimal از شرکت پلار در ایران، به طول و عرض مفید به‌ترتیب 2 و 0/95 متر، تهیه گردید. از آن‌جاکه قرار بود در تحقیق از جمع‌کننده به‌منظور تبادل حرارت ذخیره شده در مخزن با محیط گلخانه نیز استفاده شود، جمع‌کننده‌ی خورشیدی در داخل گلخانه نصب و پوشش شیشه‌ای آن حذف گردید.

صفحه و لوله‌های به‌کار رفته در این جمع‌کننده به‌ترتیب از جنس آلومینیوم و مس بودند که در قسمت پشتی، با پشم شیشه به ضخامت 3 سانتی‌متر عایق و در قسمت فوقانی با رنگ سیاه، تیره گردیدند. پایین و بالای جمع‌کننده، به‌وسیله‌ی دو شیلنگ انعطاف‌پذیر به‌ترتیب به پایین و بالای مخزن ذخیره حرارت متصل شدند. جریان آب در داخل جمع‌کننده به‌صورت ترموسیفون (به دلیل تغییر چگالی آب) و بدون پمپ، در نظر گرفته شد. در طول شب، که دمای محیط گلخانه از آب داخل مخزن ذخیره حرارت کم‌تر است، آب گرم از بخش بالایی مخزن وارد جمع‌کننده شده و پس از انتقال گرمای خود به فضای گلخانه، به دلیل خنک و چگال شدن، از طریق لوله‌های پایینی به سمت بخش پایینی مخزن ذخیره، هدایت می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، جمع‌کننده‌ی خورشیدی در طول شب وظیفه تبادل حرارت ذخیره شده در مخزن با گلخانه را به عهده دارد. اما در طول روز، نقش یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی تخت را دارد که موجب گرم شدن آب داخل مخزن می‌گردد. در این حالت، آب سرد داخل مخزن از بخش پایینی وارد جمع‌کننده‌ی تخت شده و پس از گرم شدن، چگالی آن کاهش می‌یابد، بنابراین به بالا حرکت کرده و وارد بخش بالایی مخزن می‌گردد. مشخصات اجزای مختلف سامانه گرمایشی استفاده شده در تحقیق، در جدول 1 آورده شده است.

**جدول 1- مشخصات اجزای مختلف سامانه‌ی گرمایشی و گلخانه‌ی استفاده شده در تحقیق**

**Table 1- Specifications of different components of the presented solar greenhouse heating system**

متمركز كننده خورشیدی Solar concentrator	جمع كننده خورشیدی Solar collector	گلخانه Greenhouse	پمپ Pump
نوع: متمركز كننده سهموی خطی Type: Parabolic Trough Concentrator	نوع: جمع كننده صفحه تخت Type: Flat plate	ساختار: يك طرفه Structure: Lean-to	نوع: گرندفوس Model: GRUNDFOS
جنس سهموی: استیل براق Reflector material: Stainless steel	مخزن: 200 لیتر Tank: 200 Liter	مساحت: 10/8 مترمربع Area: 10.8 m <sup>2</sup>	مدل: UPS 15-60 Type: UPS 15-60
ضریب بازتاب استیل: 93 % Reflectivity of Stainless steel: 93 %	جنس لوله: مس material of pipe: Copper	ضخامت پوشش: 10 میلی‌متر Thickness of cover: 10 mm	دبی: 3 دبی متغیر Flow rate: 3 Variable speed
طول سهموی: 166 متر Reciever tube length: 166 cm	جنس پره: آلومینیوم material of Fins: Aluminium	پوشش: پلی‌کربنات شفاف Cover: Transparent Polycarbonate	بیشینه دما: 110 درجه سانتی‌گراد Maximum Temperature: 110 °C
قطر خارجی لوله گیرنده: 5/765 سانتی‌متر Outer diameter of the reciever tube: 5.765 cm	سیال حامل: آب Working fluid: water		بیشینه فشار: 10 بار Maximum pressure: 10 bar
قطر داخلی لوله گیرنده: 4/4 سانتی‌متر Inner diameter of glass tube: 4.4 cm	مساحت: 2 مترمربع Area: 2 m <sup>2</sup>		
مساحت دهانه: 93 سانتی‌متر Aperture of collector: 93 cm			
زاویه دور: 70 درجه Rim angle: 70 °			
فاصله کانونی: 33/2 سانتی‌متر Focal length: 33.2 cm			
ردیاب: شمالی - جنوبی Direction: North-South			
سیال حامل: آب Working fluid: water			
ظرفیت مبدل حرارتی: 25 لیتر Heat exchanger capacity: 25 L			



**b**



**a**

**شکل 2- (a) سامانه‌ی گرمایش خورشیدی و (b) جمع‌کننده‌ی خورشیدی و مخزن ذخیره‌سازی گرمای نصب شده در گلخانه**  
**Fig. 2. a- The solar greenhouse heating system, b- The solar collector and heat storage tank inside the greenhouse**

دهانه‌ی متمرکزکننده‌ی خورشیدی ( $m^2$ ) و  $I$  شدت تابش خورشید ( $W m^{-2}$ ) می‌باشد. انرژی حرارتی ذخیره شده یا مصرف شده مخزن در بازه زمانی مشخص از رابطه‌ی (3) محاسبه می‌گردد (Fernandez *et al.*, 1998).

$$Q_p = m_T C_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $Q_p$  انرژی حرارتی ذخیره یا مصرف شده از مخزن در جرم آب داخل مخزن ( $kg$ )،  $T_1$  و  $T_2$  به ترتیب دمایی میانگین اولیه و نهائی مخزن ( $^{\circ}C$ ) می‌باشد. انرژی مصرف شده توسط گرم‌کن کمکی که برابر است با سطح زیر منحنی توان مصرفی-زمان از رابطه (4) به دست می‌آید (Hedayat *et al.*, 2016).

$$E_{Cons} = \int_{T_1}^{T_2} P_{Heater} dt \quad (4)$$

در رابطه (4)  $E_{Cons}$  انرژی الکتریکی مصرف شده گرم‌کن کمکی ( $J$ )،  $P_{Heater}$  توان مصرفی گرم‌کن کمکی ( $W$ ) (که به وسیله ترانسمیتر وات متر اندازه‌گیری می‌شود) و  $dt$  بازه زمانی اندازه‌گیری توان ( $s$ ) هستند.

از آن‌جاکه در طول مدت آزمایش، انرژی تابشی خورشید در طول روز و دمای محیط در شب تغییر می‌کرد، به منظور انجام مقایسه‌های آماری انرژی تولیدی در روز و انرژی مصرفی در شب، از پارامترهای شاخص حرارت ذخیره شده که بیان‌گر انرژی تولیدی به‌ازای واحد انرژی تابشی خورشیدی در روز ( $J kW^{-1} h^{-1} m^2$ ) و شاخص انرژی مصرفی که نشان‌دهنده انرژی مصرفی به‌ازای هر درجه اختلاف دمایی محیط با دمایی مطلوب گلخانه ( $J ^{\circ}C^{-1}$ ) در شب بود، استفاده گردید. سهم خورشیدی بیانگر بخشی از مجموع انرژی مصرفی است که توسط سامانه‌ی گرمایشی خورشیدی تأمین گردیده است و از رابطه (5) به دست می‌آید (Nualboonrueng *et al.*, 2013).

$$SF = \frac{Q_p}{E_{cons} + Q_p} \quad (5)$$

که  $Q_p$  در رابطه (5)، انرژی مصرف شده از مخزن در طول شب (J) است.

## نتایج و بحث

### بررسی تغییرات سرعت باد و شدت تابش خورشید

در شکل 3، نحوه‌ی تغییر سرعت باد در محل انجام آزمایش و شدت تابش بر روی سطح متمرکزکننده در طول شبانه‌روز نشان داده شده است. با توجه به شکل، میانگین سرعت باد محلی بین 2/27 تا 5/72 متر بر ثانیه تغییر کرد و در طول مدت آزمایش، بیشترین مقادیر سرعت باد در ساعات‌های بعدازظهر تا اوایل شب بوده است.

برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف از حسگرهای مدل SMT 160 با دقت 0/1 درجه سلسیوس و خطای اندازه‌گیری 0/7 درجه سلسیوس با محدوده‌ی اندازه‌گیری 130+ تا 30- درجه سلسیوس متصل به یک ترانسمیتر دما مدل TM-1323 (ساخت شرکت مهندسی تیکا در ایران) استفاده شد. این ترانسمیتر دارای 8 رله خروجی بود که با استفاده از آن‌ها گرم‌کن کمکی و دمنده تهویه گلخانه کنترل می‌گردید. شدت تابش اندازه‌گیری شده خورشید در راستای محور عمود بر سطح متمرکزکننده از نقطه‌کانون، با یک سولار متر با دقت یک وات بر مترمربع در محدوده اندازه‌گیری 0 تا 2000 وات بر مترمربع (مدل TES 1333 ساخت شرکت TES تایوان) اندازه‌گیری شد. از یک ترانسمیتر وات متر مدل TM-1510 با دقت تعیین ولتاژ 0/5 درصد در محدوده‌ی 50 تا 500 ولت و همچنین دقت اندازه‌گیری شدت جریان 0/5 درصد در محدوده‌ی 40 تا 50 آمپر، (ساخت شرکت مهندسی تیکا در ایران) برای ثبت توان مصرفی گرم‌کن کمکی الکتریکی در فاصله‌های زمانی 50 میلی-ثانیه‌ای استفاده گردید. یک سرعت سنج هوا مدل G-SUN GS-8901 ساخت کشور هنگ‌کنگ با دقت اندازه‌گیری  $\pm 3$  درصد و محدوده اندازه‌گیری صفر تا 140 متر بر ثانیه برای اندازه‌گیری سرعت باد در زمان انجام آزمایش بکار گرفته شد.

### پارامترهای مورد ارزیابی

پارامترهای مورد ارزیابی شامل توان حرارتی تولیدی به‌وسیله‌ی سامانه‌ی گرمایش خورشیدی، انرژی مصرف شده از ذخیره حرارتی و انرژی الکتریکی مصرفی در طول شب، انرژی ذخیره شده توسط سامانه‌ی گرمایش خورشیدی در طول روز و بازده حرارتی متمرکزکننده‌ی خورشیدی می‌باشند که در ادامه نحوه‌ی محاسبه‌ی هر یک از آن‌ها آورده شده است.

برای محاسبه‌ی توان حرارتی مفید تولیدی در متمرکزکننده‌ی خورشیدی از رابطه (1) استفاده گردید (Fernandez *et al.*, 1998).

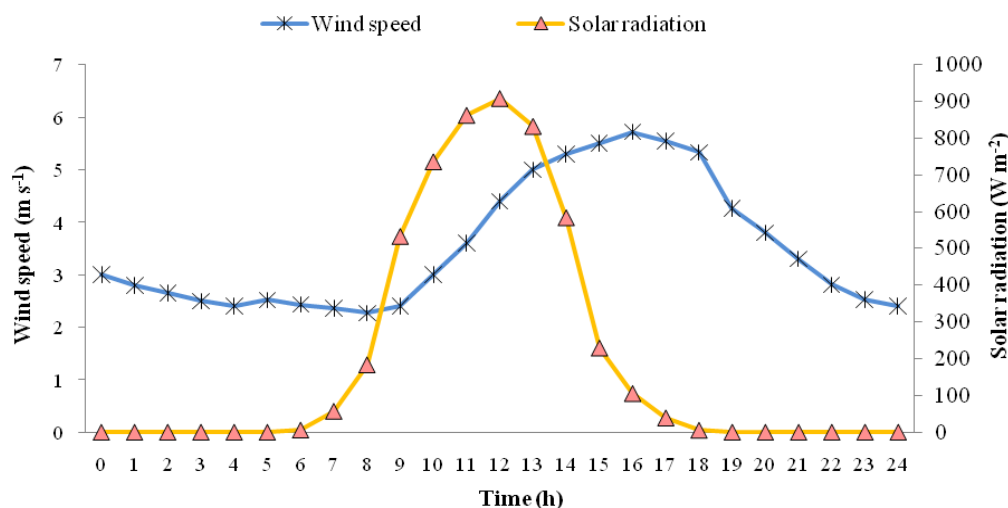
$$Q_c = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $Q_c$  توان حرارتی مفید متمرکزکننده ( $W$ )،  $\dot{m}$  دبی جرمی آب عبوری ( $kg s^{-1}$ )،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه آب ( $J kg^{-1} ^{\circ}C^{-1}$ )،  $T_o$  دمایی آب خروجی از متمرکزکننده ( $^{\circ}C$ ) و  $T_i$  دمایی آب ورودی به متمرکزکننده ( $^{\circ}C$ ) می‌باشد. بازده حرارتی متمرکزکننده از رابطه‌ی (2) به دست می‌آید (Joudi and Farhan, 2014; Xu *et al.*, 2014a).

$$\eta_{th} = \frac{Q_c}{I \times A_c} \quad (2)$$

در رابطه (2)،  $\eta_{th}$  بازده حرارتی متمرکزکننده (%)،  $A_c$  مساحت

بالاترین شدت تابش خورشید حدود 910 وات بر مترمربع بود که در حدود ساعت 12 ظهر مشاهده شد.



شکل 3- تغییرات میانگین شدت تابش خورشید و سرعت باد در مدت آزمایش

Fig. 3. Variation of the average of solar radiation intensity and wind speed during the test period

نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر جریان آب عبوری از متمرکزکننده و نوع جمع‌کننده بر حرارت ذخیره شده، مصرف انرژی از مخزن ذخیره حرارت و گرم‌کن کمکی در جدول 2 نشان داده شده است. با توجه به جدول، مشخص است که فاکتورهای آزمایش و اثر دوگانه‌ی آن‌ها تأثیر معنی‌داری، در سطح 1 درصد دارند.

#### بررسی انرژی تولیدی سامانه گرمایشی گلخانه

در شکل 5 دمای محیط و انرژی گرمایی ذخیره شده توسط سامانه گرمایشی در دبی آب عبوری 0/44 لیتر بر دقیقه و دو حالت با جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی و بدون آن را در روز (از ساعت 8 صبح تا 6 بعد از ظهر) نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کمترین دمای محیط در این مدت، 11/42 درجه سلسیوس در ساعت 8 صبح و بالاترین دما 25/2 درجه سلسیوس در ساعت 1 بعد از ظهر بوده است. همچنین، مجموع انرژی ذخیره شده توسط سامانه گرمایشی بدون جمع‌کننده و با استفاده از آن در روز به ترتیب 8/98 و 17 مگاژول بود. با وجود طلوع آفتاب از چند ساعت قبل، به دلیل دمای پایین محیط، ذخیره‌سازی گرما در مخزن آب (افزایش دمای مخزن) از ساعت حدود 9 صبح شروع گردید. بیشترین مقدار گرمای ذخیره شده، از ساعت 10 صبح تا 2 بعد از ظهر اتفاق افتاد و پس از آن به دلیل پایین آمدن تدریجی دمای محیط، بخشی از انرژی ذخیره شده مصرف گردید.

شکل 6 نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر دوگانه‌ی جریان آب عبوری و نوع جمع‌کننده بر شاخص حرارت ذخیره شده توسط سامانه

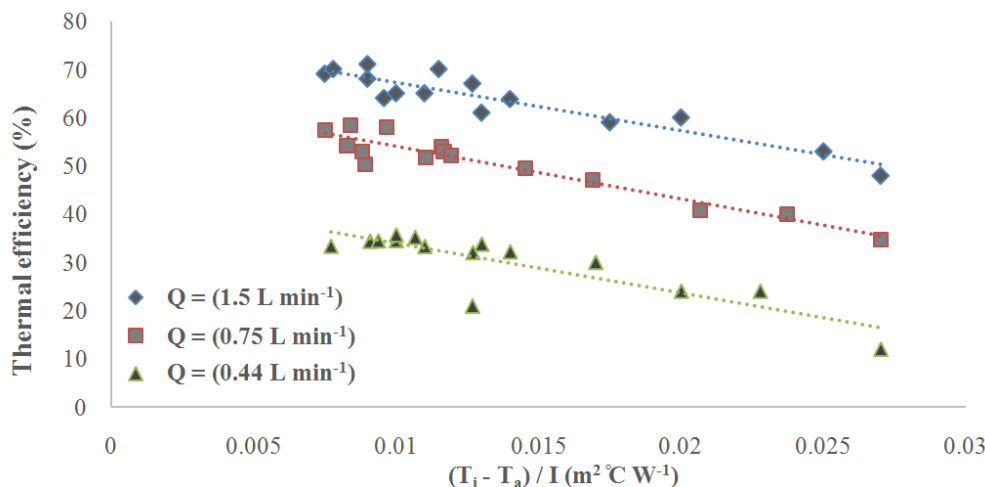
#### بررسی عملکرد متمرکزکننده‌ی خورشیدی

شکل 4 تغییرات بازده متمرکزکننده‌ی خورشیدی را در دبی‌های مختلف جریان عبوری که براساس رابطه (2) به دست آمده را نشان می‌دهد. برای یک‌سان‌سازی شرایط محیطی از محور افقی استفاده می‌گردد که در این‌جا  $T_a$  دمای محیط می‌باشد. با توجه به شکل واضح است که با افزایش دبی جریان، بازده متمرکزکننده بهبود یافته است. دلیل این امر، افزایش ضریب انتقال حرارت سیال با افزایش سرعت آن در داخل لوله می‌باشد که بهبود انتقال حرارت از بدنه لوله جاذب نور به سیال حامل حرارت را به دنبال دارد. این یافته با نتایج پژوهش پیشین همخوانی دارد (Razmipour et al., 2015). در تحقیقی با افزایش دبی سیال عبوری از 0/44 به 1/5 لیتر بر دقیقه، بازده متمرکزکننده‌ی سهموی حدود 40 درصد افزایش یافت (Zou et al., 2016). در مجموع بالاترین بازده در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه و در حدود 71 درصد مشاهده گردید. با توجه به محاسبات، بر اساس شیب نمودار در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه، در صورتی که دمای آب ورودی برابر دمای محیط باشد، بیشترین مقدار بازده متمرکزکننده به بالاتر از 77 درصد می‌رسد. بالاترین بازده متمرکزکننده در تحقیق انجام شده توسط (Padilla et al., 2011)، 76 درصد بود. در تحقیقی دیگر، بازده‌ای حدود 70 درصد برای متمرکزکننده ناودانی V- شکل به دست آمد (Chong et al., 2012). بازده حرارتی یک متمرکزکننده فرسنگ که در ساختمان سامانه گرمایش گلخانه‌ای به کار رفته بود، 71/7 درصد گزارش گردید (Imtiaz Hussain et al., 2015).



32/14 درصد بهبود داشت. دلیل این امر بهبود بازدهی حرارتی متمرکزکننده با افزایش دبی سیال عبوری است که موجب تولید انرژی حرارتی بیشتر در شدت تابش یکسان خورشید، می‌گردد.

گرمایشی خورشیدی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، با افزایش دبی آب عبوری، شاخص حرارت ذخیره شده در طول روز افزایش یافته است. به‌طوری‌که، با بالا بردن دبی از 0/44 تا 1/5 لیتر بر دقیقه، به‌طور متوسط شاخص ذخیره حرارت در مخزن



شکل 4- تغییرات بازده متمرکز کننده خورشیدی در دبی‌های مختلف آب عبوری  
 Fig.4. Variation of thermal efficiency of the PTC at the different flow rates

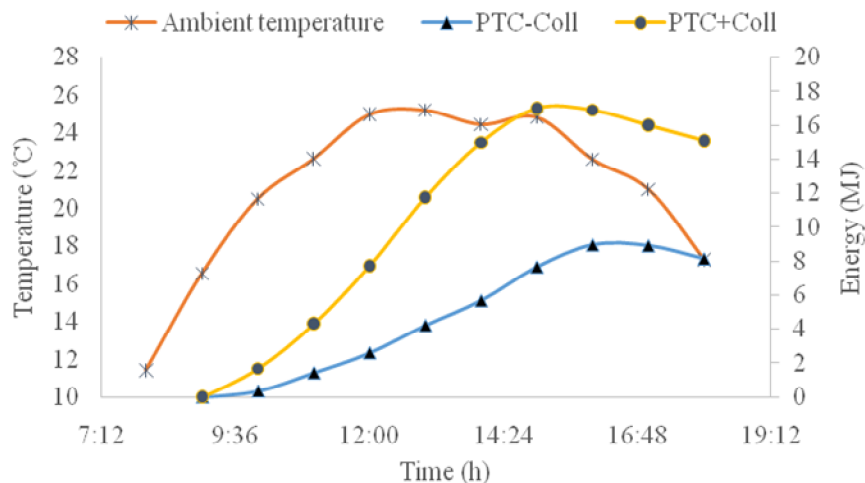
جدول 2- نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر جریان آب عبوری و نوع جمع‌کننده بر حرارت ذخیره شده، مصرف انرژی از مخزن ذخیره حرارت و گرم‌کن کمکی

Table 2- Analysis of variance of the effect of flow rate and mode of heating on stored heat and energy consumption from the heat storage tank and the auxiliary heater

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean of square		
		شاخص حرارت ذخیره شده در مخزن Heat stored in the tank	شاخص انرژی مصرفی گرم‌کن برقی Energy consumption of the auxiliary heater	شاخص انرژی مصرف شده از مخزن Energy consumption from the Tank
حالت	1	5.3247**	4.5501**	5.2488**
Mode				
دبی آب	2	1.0072**	2.3121**	2.3022**
Water flow				
دبی آب * حالت	2	0.0865**	0.5895**	0.4472**
Mode * Water flow				
خطا	12	0.0016	0.0013	0.0015
Error				
کل	17			
Total				

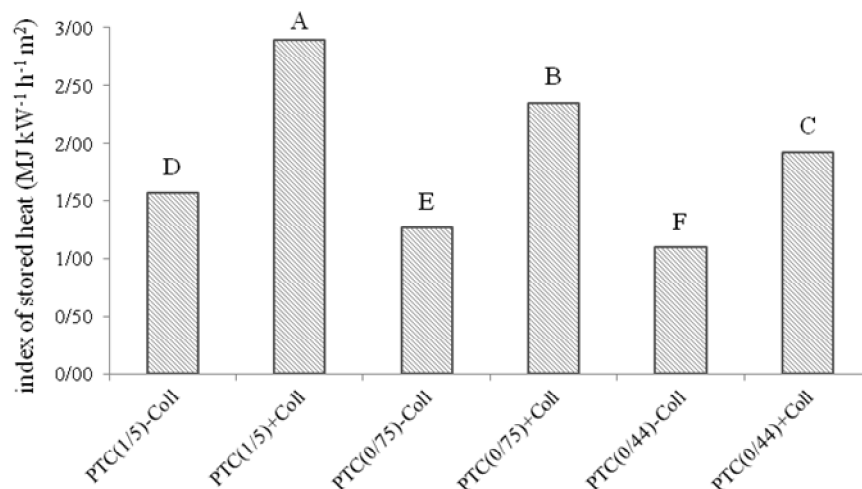
\* و \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال 5 و 1 درصد، <sup>ns</sup> غیرمعنی‌دار  
 \*, \*\* Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, <sup>ns</sup> Non. Significant





شکل 5- تغییرات دمای محیط و انرژی ذخیره شده توسط سامانه گرمایشی در روز در دو حالت با (PTC+Coll) و بدون (PTC-Coll) استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی

Fig.5. Variation of ambient temperature and stored heat during sunshine time with (PTC+Coll) and without (PTC-Coll) flat plate solar collector



شکل 6- اثر متقابل دبی و حالت گرمایش خورشیدی بر شاخص حرارت ذخیره شده (عدد داخل پرانتز در محور افقی نشان‌دهنده دبی سیال عبوری (است) (L min<sup>-1</sup>))

Fig.6. Interaction of flow rate and mode of heating on index of stored heat (the numbers within the parenthesis on horizontal axis shows the flow rate (L min<sup>-1</sup>))

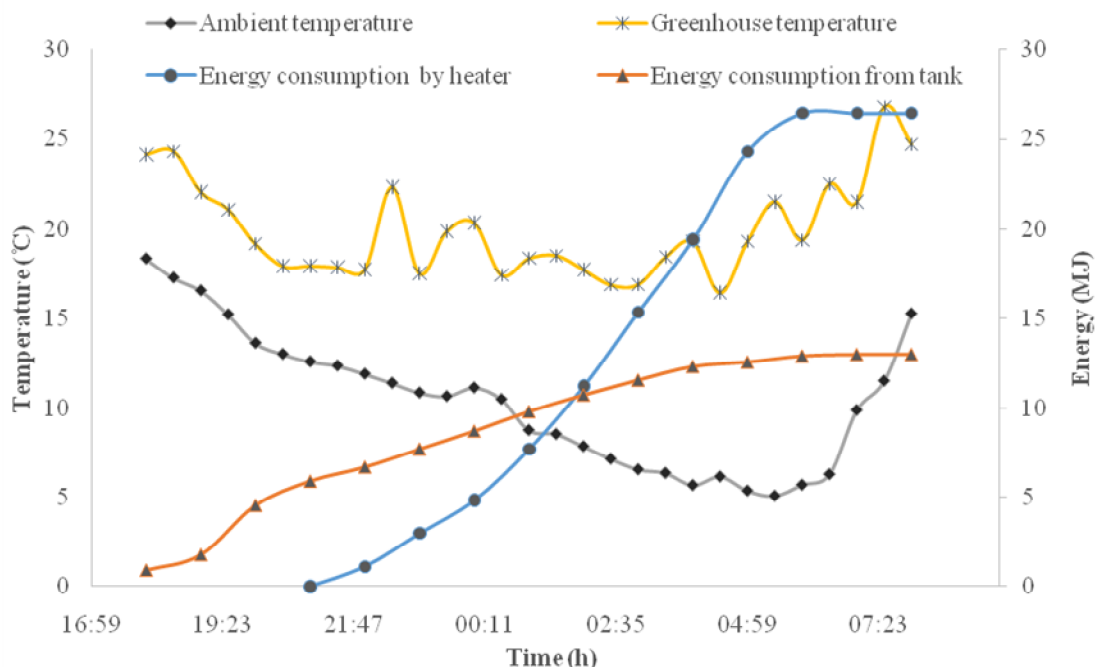
Attar and Farhat, ( ) این یافته مطابق نتایج پژوهش پیشین ( Attar and Farhat, 2015) می‌باشد. به‌علاوه، به‌طور متوسط با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی در کنار متمرکزکننده، شاخص ذخیره‌ی حرارت در طول روز 45/42 درصد بهبود یافت. به‌طور مشابه، در تحقیقی، متوسط بازده حرارتی روزانه یک جمع‌کننده تخت جابه‌جایی طبیعی (Koffi et al., 2014) در مجموع می‌توان گفت، بالاترین ذخیره‌ی انرژی 2/9 مگاژول به‌ازای هر کیلووات ساعت بر مترمربع، انرژی تابشی خورشید طول روز بود که در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده گردید.

(ترموسیفون) حدود 49/8 درصد گزارش گردید ( Koffi et al., 2014). در مجموع می‌توان گفت، بالاترین ذخیره‌ی انرژی 2/9 مگاژول به‌ازای هر کیلووات ساعت بر مترمربع، انرژی تابشی خورشید طول روز بود که در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده گردید.

بررسی انرژی مصرفی گلخانه

مصرف انرژی از مخزن در ساعت‌های اولیه و تا حدود ساعت 3:30 بامداد مشاهده گردید و پس از آن، در حدود ساعت 5:30 بامداد گرم‌کن کمکی به‌تنهایی گرمای مورد نیاز گلخانه را تأمین کرده‌است. از ساعت 5:30 صبح به بعد به دلیل طلوع آفتاب و نیز گرم شدن هوا مصرف انرژی از گرم‌کن و ذخیره مخزن ناچیز بوده و می‌توان گفت متوقف شده‌است. در مجموع، حرارت تأمین شده از مخزن ذخیره 12/98 مگاژول و انرژی مصرفی گرم‌کن کمکی 26/44 مگاژول در طول شب بود.

تغییرات دمای محیط و گلخانه و مقدار مجموع مصرف انرژی در طول شب (از ساعت 6 بعد از ظهر تا 8 صبح روز بعد)، برای دبی آب عبوری 0/44 لیتر بر دقیقه و با جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی، در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به شکل، کمینه دمای محیط در طول شب حدود 5 درجه سلسیوس در ساعت 5:30 بامداد بود. در ساعت‌های اولیه شب گرم‌کن کمکی خاموش و انرژی ذخیره شده، به‌تنهایی قادر به تأمین حرارت گلخانه بوده است. بالاترین نرخ



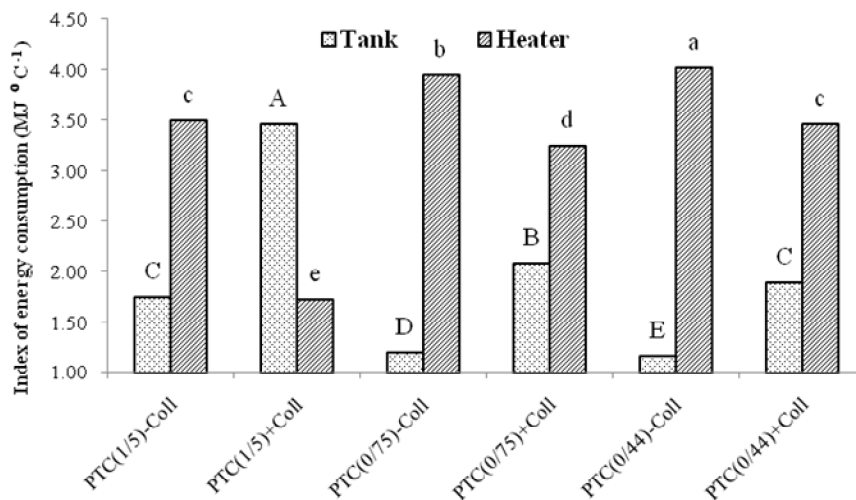
شکل 7 - تغییرات دمای محیط و گلخانه و مصرف انرژی از مخزن ذخیره‌سازی و انرژی مصرف شده توسط گرم‌کن کمکی در شب  
 Fig.7. Variation of ambient and greenhouse temperature and energy consumption from the storage tank and by the electric heater at night time

به‌طور متوسط 26/67 درصد در مصرف برق گرم‌کن کمکی صرفه‌جویی گردید. بودیلا و همکاران در سال 2014 از سامانه گرمایش خورشیدی مجهز به جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی و مواد ذخیره‌کننده حرارت تغییر فاز دهنده برای گلخانه استفاده کردند و نتایج آن‌ها حاکی از صرفه‌جویی 31 درصدی در مصرف سوخت‌های فسیلی با به‌کارگیری سامانه مورد نظر در تونس بود (Bouadiela et al., 2014). به‌طور مشابه، افزایش دبی آب عبوری در متمرکزکننده از 0/44 تا 1/5 لیتر بر دقیقه، به‌طور متوسط شاخص مصرف انرژی گرم‌کن کمکی را 30 درصد کاهش داد. که دلیل آن ذخیره انرژی حرارتی بیشتر در مخزن، به دلیل بهبود بازده حرارتی مجموعه متمرکزکننده‌ی سهموی با افزایش دبی آب عبوری است. در مجموع،

در شکل 8 نتایج مقایسه‌ی میانگین اثر دوگانه‌ی جریان آب عبوری و نوع جمع‌کننده بر شاخص انرژی مصرفی گرم‌کن کمکی و ذخیره شده توسط سامانه گرمایشی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مصرف انرژی ذخیره شده توسط سامانه‌ی خورشیدی در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه با جمع‌کننده بیشتر از سایر شرایط سامانه‌ی گرمایشی بود. به‌طوری‌که، به‌جز این حالت، مصرف انرژی از گرم‌کن کمکی بیشتر از بخش تأمین شده توسط سامانه گرمایش خورشیدی مشاهده گردید. به‌علاوه، استفاده از جمع‌کننده در سامانه گرمایش، موجب کاهش زمان روشن ماندن گرم‌کن کمکی و در نتیجه شاخص مصرف انرژی کم‌تر آن شده است. به‌طوری‌که، با توجه به مشاهدات آزمایش، با استفاده از جمع‌کننده،

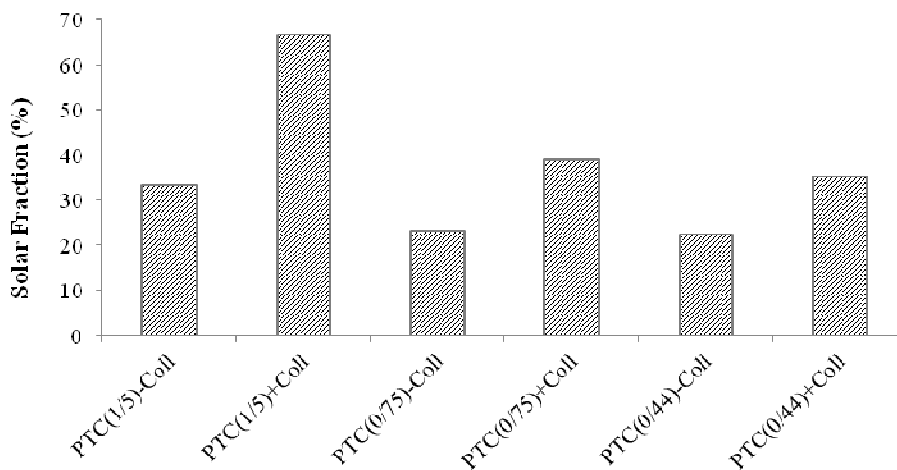
بیشتری در مخزن ذخیره شود، جمع‌کننده انرژی بیشتری را در اختیار گلخانه قرار می‌دهد. این کار به دلیل اختلاف دمایی بالاتر مخزن و گلخانه که موجب بالارفتن دبی سیال در داخل جمع‌کننده می‌گردد، انجام می‌شود.

بیشترین انرژی مصرف شده توسط گرم‌کن کمکی در کم‌ترین دبی آب عبوری و بدون استفاده از جمع‌کننده، برابر 4/03 مگاژول به‌ازای هر درجه اختلاف دمای محیط با دمای مطلوب گلخانه بود. از مقایسه شکل‌های 8 و 6 می‌توان نتیجه گرفت که در صورتی که انرژی



شکل 8- اثر متقابل دبی و حالت استفاده از سامانه گرمایش بر شاخص انرژی مصرفی از مخزن و شاخص انرژی مصرفی گرم‌کن (عدد داخل پرانتز در محور افقی نشان‌دهنده دبی سیال (L min<sup>-1</sup>) عبوری است)

Fig. 8. Interaction of flow rate and mode of heating on index of energy consumption from the storage tank and by the electric heater (the numbers within the parenthesis on horizontal axis shows the flow rate (L min<sup>-1</sup>))



شکل 9- سهم خورشیدی در شرایط مختلف کاری سامانه گرمایش خورشیدی گلخانه (عدد داخل پرانتز در محور افقی نشان‌دهنده دبی سیال عبوری (L min<sup>-1</sup>) می‌باشند)

Fig. 9. Variation of solar fraction at different working conditions of the solar greenhouse heating system (the numbers within the parenthesis on horizontal axis shows the flow rate (L min<sup>-1</sup>))

با افزایش دبی سیال عبوری، به دلیل بازده حرارتی بالاتر متمرکزکننده و دریافت حرارت بیشتر از خورشید، سهم خورشیدی

در شکل 9 تغییرات سهم انرژی خورشیدی در شرایط مختلف کاری سامانه گرمایش گلخانه نشان داده شده است. با توجه به شکل،

الف) بیشترین بازده حرارتی متمرکزکننده خورشیدی برابر 71 درصد در بالاترین دبی عبوری مشاهده گردید.  
 ب) بیشترین میزان ذخیره‌ی انرژی 2/9 مگاژول به‌ازای هر کیلووات ساعت بر مترمربع، انرژی تابشی خورشید در طول روز بود که در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده گردید.  
 ج) با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی، به‌طور متوسط حدود 26/67 درصد در مصرف برق گرم‌کن کمکی صرفه‌جویی گردید.

د) به‌طور متوسط شاخص مصرف انرژی گرم‌کن الکتریکی، با افزایش دبی آب عبوری در متمرکزکننده از 0/44 تا 1/5 لیتر بر دقیقه، 30 درصد کاهش یافت.  
 ه) بیشترین سهم خورشیدی به‌دست آمده، 66 درصد بود که در بالاترین دبی سیال عبوری و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده گردید.

بهبود یافت. به‌طوری‌که، به‌صورت متوسط سهم خورشیدی در دبی 1/5 لیتر بر دقیقه، 21 درصد بالاتر از دبی 0/44 لیتر بر دقیقه بود. از طرفی، سهم خورشیدی با استفاده از جمع‌کننده به‌طور متوسط 20/67 درصد افزایش یافت. دلیل این امر تولید حرارت خورشیدی بیشتر توسط سامانه با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی است. درنهایت، بیشترین سهم خورشیدی به‌دست آمده، 66 درصد بود که در بالاترین دبی سیال عبوری و با استفاده از جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی مشاهده گردید.

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد یک سامانه گرمایش خورشیدی مجهز به متمرکزکننده و جمع‌کننده‌ی خورشیدی دومانظوره مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های مربوط به ارزیابی سامانه مورد نظر، در 3 دبی آب عبوری از داخل متمرکزکننده و دو حالت با و بدون جمع‌کننده‌ی تخت خورشیدی انجام شد. نتایج به‌دست آمده از تحقیق به‌طور خلاصه عبارتند از:

### References

- Attar, I., and A. Farhat. 2015. Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate. *Solar Energy* 119: 212-224.
- Bal, L. M., and S. Satya, and S. N. Naik. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2298-2314.
- Benli, H. 2011. Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating. *Energy Conversion and Management* 52: 581-589.
- Benli, H., and A. Durmuş. 2009a. Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating. *Energy and Buildings* 41: 220-228.
- Benli, H., and A. Durmuş. 2009b. Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. *Solar Energy* 83: 2109-2119.
- Bouadila, S., S. Skouri, S. Kooli, M. Lazaar, and A. Farhat. 2014. Solar energy storage application in Tunisian greenhouse by means of phase change materials. Pages 1-4. *Composite Materials & Renewable Energy Applications (ICCMREA), 2014 International Conference on: IEEE*.
- Chau, J., T. Sowlati, S. Sokhansanj, F. Preto, S. Melin and X. Bi. 2009. Economic sensitivity of wood biomass utilization for greenhouse heating application. *Applied Energy* 86: 616-621.
- Chong, K. K., and K. G. Chay, and K. H. Chin. 2012. Study of a solar water heater using stationary V-trough collector. *Renewable Energy* 39: 207-215.
- Critten, D., and B. Bailey. 2002. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and forest Meteorology* 112: 1-22.
- Esen, M., and T. Yuksel. 2013. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings* 65: 340-351.
- Fernandez, F., F. G. Camacho, J. Perez, J. Sevilla, and E. M. Grima. 1998. Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: effects of dilution rate, tube diameter, and solar irradiance. *Biotechnology and Bioengineering* 58: 605-616.
- Ghosal, M., and G. Tiwari. 2004. Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar energy* 76: 603-613.
- Ghosal, M., and G. Tiwari. 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy conversion and management* 47: 1779-1798.

14. Hedayat, M., H. Mortezaipoor, H. Maghsoudi, and M. Shamsi. 2016. Performance Investigation of a Heat Recovery Assisted Solar Dryer for Mint Drying. *Iranian Journal of Biosystem Engineering* 46 (4): 379-388. (In Farsi).
15. Imtiaz Hussain, M., and A. Ali, and G. H. Lee. 2015. Performance and economic analyses of linear and spot Fresnel lens solar collectors used for greenhouse heating in South Korea. *Energy* 90 (2): 1522-1531.
16. Jaber, J. O. 2002. Prospects of energy savings in residential space heating. *Energy and Buildings* 34: 311-319.
17. Jakhar, S., R. Misra, V. Bansal, and M. Soni. 2015. Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India. *Energy and Buildings* 87: 360-369.
18. Joudi, K. A., and A. A. Farhan. 2014. Greenhouse heating by solar air heaters on the roof. *Renewable Energy* 72: 406-414.
19. Kissock, J. K., and C. Eger. 2008. Measuring industrial energy savings. *Applied Energy* 85: 347-361.
20. Koffi, P. M. E., B. K. Koua, P. Gbaha, and S. Touré. 2014. Thermal performance of a solar water heater with internal exchanger using thermosiphon system in Côte d'Ivoire. *Energy* 64: 187-199.
21. Kooli, S., S. Bouadila, M. Lazaar, and A. Farhat. 2015. The effect of nocturnal shutter on insulated greenhouse using a solar air heater with latent storage energy. *Solar Energy* 115: 217-228.
22. Nualboonrueng, T., P. Tuenpusa, Y. Ueda, and A. Akisawa. 2013. The performance of PV-t systems for residential application in Bangkok. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21: 1204-1213.
23. Ozgener, O., and A. Hepbasli. 2006. An economical analysis on a solar greenhouse integrated solar assisted geothermal heat pump system. *Journal of Energy Resources Technology* 128: 28-34.
24. Öztürk, H. H. 2005. Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating. *Energy Conversion and Management* 46: 1523-1542.
25. Padilla, R. V., G. Demirkaya, D. Y. Goswami, E. Stefanakos, and M. M. Rahman. 2011. Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. *Applied Energy* 88: 5097-5110.
26. Paksoy, M., Ö. Turkman, and M. Direk. 2010. Importance of geothermal water using for greenhouse heating in Turkey. *Selcuk Tarim Ve Gıda Bilimleri Dergisi* 24: 50-53.
27. Razmipour, M., N. Alavi Naeini, H. Mortezaipoor, and A. Ghazanfari Moghadam. 2015. Performance evaluation of a solar dryer with finny, perforated absorber plate collector equipped with an air temperature control system for dill drying. *Journal of Agricultural Machinery* 5: 134-142. (In Farsi).
28. Santamouris, M., A. Argiriou, and M. Vallindras. 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar Energy* 52: 371-378.
29. Sethi, V., K. Sumathy, C. Lee, and D. Pal. 2013. Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy* 96: 56-82.
30. Taki, M., Y. Ajabshirchi, R. Abdi, and O. Akbarpour. 2012. Analysis of Energy Efficiency for Greenhouse Cucumber Production Using Data Envelopment Analysis (DEA) Technique; Case Study: Shahreza Township. *Journal of Agricultural Machinery* 2: 28-37. (In Farsi).
31. Teitel, M., I. Segal, A. Shklyar, and M. Barak. 1999. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72: 259-273.
32. Tiwari, G., and N. Dhiman. 1986. Design and optimization of a winter greenhouse for the Leh-type climate. *Energy Conversion and Management* 26: 71-78.
33. Xu, J., and A. Buzzatti, and M. Gyulassy. 2014a. Azimuthal jet flavor tomography with CUJET2.0 of nuclear collisions at RHIC and LHC. *Journal of High Energy Physics* 2014: 1-90.
34. Xu, J., Y. Li, R. Wang, and W. Liu. 2014b. Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy* 67: 63-73.
35. Zou, B., J. Dong, Y. Yao, and Y. Jiang. 2016. An experimental investigation on a small-sized parabolic trough solar collector for water heating in cold areas. *Applied Energy* 163: 396-407.

## Experimental Investigation of a Solar Greenhouse Heating System Equipped with a Parabolic Trough Solar Concentrator and a Double-Purpose Flat Plate Solar Collector

M. Jafari<sup>1</sup>- H. Mortezapour<sup>2\*</sup>- K. Jafari Naeimi<sup>2</sup>- M. M. Maharlooie<sup>2</sup>

Received: 21-06-2016

Accepted: 14-09-2016

### Introduction

Greenhouses provide a suitable environment in which all the parameters required for growing the plants can be controlled throughout the year. Greenhouse heating is one of the most important issues in productivity of a greenhouse. In many countries, heating costs in the greenhouses are very high, having almost 60-80% of the total production costs. In recent years, several studies have attempted to reduce the heating costs of the greenhouses by applying more energy efficient equipment and using the renewable energy sources as alternatives or supplementary to the fossil fuels.

In the present study a novel solar greenhouse heating system equipped with a parabolic trough solar concentrator (PTC) and a flat-plate solar collector has been developed. Therefore, the aim of this paper is to investigate the performance of the proposed heating system at different working conditions.

### Materials and Methods

The presented solar greenhouse heating system was comprised of a parabolic trough solar concentrator (PTC), a heat storage tank, a pump and a flat plate solar collector. The PTC was constructed from a polished stainless steel sheet (as the reflector) and a vacuum tube receiver. The PTC was connected to the tank by using insulated tubes and a water pump was utilized to circulate the working fluid through the PTC and the heat exchanger installed between walls of the tank. The uncovered solar collector was located inside the greenhouse. During the sunshine time, a fraction of the total solar radiation received inside the greenhouse is absorbed by the solar collector. This rises the temperature of the working fluid inside the collector which led to density reduction and natural flow of the fluid. In other words, the collector works as a natural flow flat plate solar collector during the sunshine time. At night, when the greenhouse temperature is lower than tank temperature, the fluid flows in a reverse direction through the solar collector and the stored heat transferred from the collector surface to the greenhouse.

The evaluation tests were conducted at three levels of fluid flow rate through the solar concentrator (0.44, 0.75 and 1.5 Lmin<sup>-1</sup>) and two different working modes of the heat exchanger.

### Results and Discussion

The variation of thermal efficiency of the PTC at different flow rates has been illustrated in Fig 3. As shown, thermal efficiency increased with flow rate mainly because the fluid convection coefficient enhances with raising the velocity of the fluid inside the tubes.

The heat storing process began from 9 am and the highest amounts of the stored heat during sunshine time occurred between 10 am and 2 pm. Fig 5 showed that the stored energy in the tank enhanced when the flat plate collector was employed beside the PTC. Also, increasing the fluid flow rate from 0.44 to 1.5 Lmin<sup>-1</sup> improved the index of stored heat by 32.14%. Energy consumption during the night time was also significantly changed with flow rate and the mode of heating. Fig 7 indicated that the electrical energy consumption was lower with flat plate solar collector and it is possible to save the electrical energy by 26.67% using the flat plate collector. Bouadila et al., (2014) concluded that the electrical energy consumption reduced by 31% employing a natural

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

(\* - Corresponding Author Email: h.mortezapour@uk.ac.ir)

convection flat plate solar collector system equipped with phase changed heat storage material for greenhouse heating.

Since increasing the flow rate enhanced the thermal efficiency of the solar concentrator system and led to an improvement in stored thermal energy during the sunshine time, solar fraction increased with raising the flow rate from 0.44 to 1.5 Lmin<sup>-1</sup>. A maximum solar fraction of 66% was achieved at the highest flow rate when using the flat plate solar collector beside the PTC.

## Conclusions

An experimental comparative study was conducted to investigate the performance of a novel solar greenhouse heating system at the different fluid flow rates and two modes of heating (with and without flat plate solar collector). The results can be summarized as follows:

A maximum thermal efficiency of about 71% was achieved at the flow rate of 1.5 Lmin<sup>-1</sup>.

Raising the flow rate from 0.44 to 1.5 Lmin<sup>-1</sup> improved the index of stored heat and solar fraction by 32.14% and 21%, respectively.

The highest value of solar fraction was found to be 66% at the highest flow rate when engaging the flat plate solar collector beside the PTC.

**Keywords:** Flat plate solar collector, Greenhouse heating, Solar concentrator