

طراحی، ساخت و بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با سیستم مخزن ذخیره انرژی گرمای نهان با استفاده از نمک گلوبر

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران،
a.bensaeid87@gmail.com
استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران،
s.azizi.chem@gmail.com
دانشیار، گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران،
peyghambarzadeh@gmail.com

احمد بن سعید

شیماء عزیزی*

سید محسن پیغمبرزاده

چکیده

در این مقاله، یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی که قابلیت نصب مخزن گرمایی جهت ذخیره انرژی گرمای نهان (LHTESS) را دارد ساخته شد و از نمک گلوبر به عنوان ماده تغییر فاز دهنده (PCM) در مخزن گرمایی برای ذخیره انرژی گرمایی استفاده شد. استفاده از بند نیز در لبه هر پلکان موجب هدایت اجباری جریان آب بر روی صفحه جذب کننده و افزایش زمان ماند آن درون دستگاه شد. کارکرد گرمایی دستگاه با مخزن (LHTESS) و بدون مخزن ذخیره گرمایی (WLHTESS) در روزهای گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ساعات آفتابی میزان تولید آب شیرین در دستگاه بدون مخزن گرمایی از دستگاه با مخزن گرمایی بیشتر است اما در ساعات پس از غروب آفتاب، میزان آب شیرین تولید شده به کمک دستگاه با مخزن گرمایی به میزان چشمگیری از دستگاه بدون مخزن گرمایی بیشتر است. به علاوه، نتایج نشان داد که با افزایش میزان دبی ورودی آب شور از ۵۰ به ۱۵۰ ml/min برای دستگاه بدون مخزن ذخیره انرژی، میزان آب شیرین تولید شده از ۴۲۳ به ۲۵۲ ml/m² day و برای دستگاه با مخزن ذخیره انرژی از ۳۹۶ به ۲۳۵ ml/m² day کاهش می یابد.

واژه‌های کلیدی: نمک زدایی، آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، تولید آب شیرین، ماده تغییر فاز دهنده.

Design, Fabrication, and Analysis of the Performance of Cascade Solar Water Sweetening Accompanied with Latent Heat Thermal Energy Storage System Using Glauber Salt

A. Bensaeid

Sh. Azizi

S.M. Peyghambarzadeh

Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

Abstract

In this paper, a cascade solar water sweetening still with the capability of installing latent heat thermal energy storage system (LHTESS) was fabricated, and the Glauber salt as a phase change material (PCM) was used in the thermal reservoir for thermal energy storage. Application of weir on the cascade edge leads to force water flow on the absorption sheet and increases the residence time in the apparatus. Thermal performance of the still with (LHTESS) and without thermal energy storage system (WLHTESS) were analyzed at different days. Results showed that the amount of sweet water productivity in WLHTESS is higher than that of LHTESS at the sunny days. However, after the sunset, the amount of produced sweet water in the LHTESS is considerably greater than of the WLHTESS. Furthermore, results showed that increasing the flow rate of sour water from 50 to 150 ml/min for the WLHTESS decreased the sweet water production from 423 to 252 ml/m² day and for LHTESS from 396 to 235 ml/m² day.

Keywords: desalination, cascade solar water sweetening, sweet water production, phase change material.

۱- مقدمه

در جوامع بشری می باشد و این در حالی است که برخلاف روند رو به رشد جمعیت جهان با کاهش منابع آبی روبرو هستیم. کم آبی سبب شده که بسیاری از کشورها توجه ویژه ای به این موضوع داشته باشند و پژوهشگران و دانشمندان را بر آن داشته که پژوهش های گسترده در بررسی و شناخت عوامل بروز کم آبی و مقابله با آن انجام دهند. یک راه حل مناسب برای تهیه ای آب سالم و آشامیدنی در مناطق خشک و دور دست، استفاده کردن از انرژی خورشیدی می باشد که اغلب این مناطق دارای پتانسیل بالای انرژی خورشید و منابع آب شور برای تولید آب شیرین می باشند [۲]. کشورهای خاورمیانه و کشورهای حاشیه ای خلیج فارس، از بزرگ ترین کشورهای استفاده کننده از روش های تولید آب شیرین با استفاده از انرژی خورشید می باشند که

حیات در زمین بستگی به آب دارد که یک عنصر ضروری برای زندگی است. سه چهارم سطح سیاره با آب پوشیده شده است اما ۹۷ درصد از این مقدار عظیم در اقیانوس ها وجود دارد که آب شور است و تنها ۳ درصد آن آب شیرین است. با این وجود، این درصد کوچک از آب های زمین بیشتر نیازهای بشریت را تأمین می کند و در دریاچه ها، رودخانه ها و آب های زیرزمینی وجود دارد. همان طور که می توان فهمید تنها منابع غیر قابل استفاده از آب، عمدتاً اقیانوس ها هستند که باین حال، دارای شوری خیلی زیاد و بسیار بالاتر از حد مصرف مجاز هستند [۱]. امروزه روبرو شدن با بحران کم آبی یکی از مشکلات عمده

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.azizi.chem@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۰۷

بیشتر از ۵۰ کشور های استفاده کننده از این روش ها را تشکیل می دهند. کشورهای ثروتمند نفت خیز مانند کویت، قطر، بحرین، عربستان و امارات نزدیک به ۹۵٪ آب مورد نیاز در صنایع نفت خود را توسط چگالش آب دریاها تهیه می نمایند [۳]. مطالعات نشان می دهد میزان جمعیت در بیشتر کشورهای منطقه مانند اسرائیل، اردن، مصر و تونس به سرعت رو به افزایش بوده و بیشتر منابع آب استخراج شده و بازده این منابع رو به کاهش می گذارد و مصرف آب شیرین در این کشورها فزاینده خواهد رفت [۳]. این کشورها با استفاده از انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی و در دسترس بودن آن میزانی از آب شیرین مورد نیاز خود را در مقیاس کم یا میانه تولید می نمایند. استفاده از انرژی خورشید در تولید آب شیرین یک راه حل مناسب برای تهیه ۵۰٪ آب مورد نیاز روستاها و مناطق خشک و دورافتاده می باشد [۳].

در روزهای آفتابی که میزان تابش زیاد می باشد، استفاده از روش های ذخیره گرمایی امری ضروری می باشد. بنابراین با استفاده از یک طراحی مناسب به کمک روش های ذخیره گرمایی می توان بازده این دستگاه ها را بهبود بخشید [۴]. استفاده از موادی که به هنگام ذخیره گرما دچار تغییر فاز می گردند، یک روش مناسب برای ذخیره گرما در دستگاه های خورشیدی است زمانی که دمای عملیاتی بین ۱۵ تا ۹۰ درجه سلسیوس می باشد [۵]. مزایای این روش انجام فرایند به صورت هم دما و قابلیت ذخیره مقدار زیاد انرژی می باشد و موجب کاهش اندازه دستگاه ها نیز می گردد. موادی که برای استفاده در این روش مورد استفاده قرار می گیرند باید ویژگی هایی مانند تعادل مناسب فازی، چگالی بالا، تغییر حجم کم، فشار بخار کم، پایداری شیمیایی، غیر سمی بودن، غیر قابل اشتعال بودن، در دسترس بودن، و ارزان بودن را دارا باشند [۶]. مواد تغییر فاز دهنده^۱ به سه دسته عمده مواد آلی، مواد معدنی و اکتیک مواد آلی و معدنی تقسیم می شوند. بنابراین با استفاده از روش های ذخیره گرمایی و ترکیب آن ها با دستگاه های خورشیدی، می توان یک تعادل بین میزان دریافت انرژی خورشید و میزان مصرف برقرار کرد. استفاده از این روش ها موجب بالا رفتن بازده دستگاه ها و پیشگیری از هدر رفت گرمایی می گردد.

Radhwan [۷] چند حوضچه را به گونه ای پی در پی کنار هم قرارداد و پایین صفحه جذب کننده را از واکس پارافین به عنوان PCM پر کرد و به عنوان منبع ذخیره گرما استفاده نمود. هوا از پایین دستگاه وارد می شد و در فضای بین شیشه و سطح آب جریان می یافت و پس از مرطوب شدن از بالای دستگاه بیرون می رفت و در بخش دیگری چگالش می یافت. زمانی که دمای حوضچه از پارافین بیشتر بوده گرما از صفحه جذب کننده به PCM انتقال یافته و این فرایند تا ذوب کامل PCM ادامه می یافت. در هنگام شب که دمای صفحه جذب کننده از PCM بیشتر شده، انتقال گرما از PCM به صفحه و سپس به آب صورت گرفته تا به نقطه انجماد خود رسیده و این انتقال گرما موجب ادامه فرایند در هنگام شب می شود.

در مطالعه دیگری که در دانشگاه بحرین انجام شد، بخار را پیش از رسیدن به شیشه استخراج کرده و سپس در یک سری لوله های مسی که در دمای پایین تر از بخار هستند مایع می کنند. در این روش یک فن چگالنده تعبیه شده که بخار را پیش از رسیدن به شیشه مکیده و به

درون لوله L شکل هدایت می نماید. زمانی که فن (دمنده) خاموش باشد دستگاه به صورت خودکار فعال شده و مانند یک دستگاه حوضچه ای ساده کار می نماید. در هنگام روز، فن اجازه نمی دهد که بخار به شیشه رسیده و آن را مکش می نماید و در هنگام شب مانند دستگاه حوضچه ای ساده عمل کرده و از ذخیره گرمایی خود استفاده می نماید [۸].

Yaduv و Tiwary [۹] نیز یک دستگاه حوضچه ای با پوشش یک تکه ای را با یک چگالنده ترکیب کردند و این موجب افزایش بازده آب شیرین کن شد. یکی از راه های افزایش بازده، استفاده از گرمایش آب ورودی و گرما دادن به آب شور درون آب شیرین کن هست. در دستگاه هایی که ورود و خروج جریان آب به گونه ای پیوسته انجام می پذیرد، از آب گرم شده در خروجی می توان برای ورودی به دستگاه استفاده نمود که این امر با اضافه کردن پمپ امکان پذیر هست. این کار برای بالا نگه داشتن دمای آب ورودی انجام می گیرد. منبع های گرمایی بیرونی، ظرفیت گرمایی آب شور را افزایش می دهد و موجب افزایش میزان تبخیر می گردند.

Hikmaet [۱۰] بررسی کرد که هر چه میزان نرخ ورودی آب شور ورودی کمتر باشد بازده بالاتر می رود زیرا زمان ماند آب روی صفحه تبخیر کننده بیشتر می گردد و دمای آب افزایش می یابد. البته نرخ های خیلی کم آب شور ورودی موجب کانالیزه شدن جریان آب روی صفحه می گردد. با تنظیم مناسب نرخ آب شور ورودی می توان دما را کنترل نموده و زمان ماند را نیز افزایش داد.

سرعت وزش باد یک عامل تأثیرگذار بر روی میزان اتلاف گرما از شیشه به محیط می باشد. هر چه هوا صاف تر باشد تابش مستقیم رسیده از خورشید به دستگاه بیشتر می شود و قابلیت جذب پرتوهای خورشید افزایش می یابد [۱۱]. نظریه های پژوهشگران در مورد تأثیر سرعت باد متفاوت می باشد. Tiwari [۱۱] بررسی کرد که افزایش سرعت باد موجب کم شدن دمای شیشه و افزایش میزان چگالش در حوضچه های عمیق می شود و تأثیری بر کارکرد حوضچه های کم عمق ندارد. Soliman [۱۲] بررسی کرد که افزایش سرعت باد موجب افزایش میزان آب شیرین در خروجی می گردد.

Tiwari [۱۱] نشان داد که با تغییر زاویه شیشه از صفر تا ۴۵ درجه، نرخ تبخیر کاهش و از ۴۵ تا ۶۰ درجه، افزایش می یابد. Solaiman [۱۲] بررسی کرد که خروجی آب شیرین با کاهش زاویه شیشه افزایش می یابد. Tiwari [۱۳] بررسی کرد که در روزهای سرد افزایش زاویه شیشه موجب افزایش تولید آب شیرین و در روزهای گرم افزایش شیب شیشه موجب کاهش میزان تولید آب شیرین می گردد. تغییر در زاویه شیشه موجب تغییر در فاصله شیشه تا سطح آب شور نیز می گردد که تا حد امکان باید کمترین فاصله بین شیشه تا سطح آب شور وجود داشته باشد تا فضای درون محفظه به گونه ای کامل از بخار اشباع گردد. Edlin و Bahadori [۱۴] فاصله شیشه از سطح آب شور را ۵ تا ۷ سانتی متر در نظر گرفتند. Hikmaet [۱۰] و Abulhamayel [۱۵] فاصله شیشه تا سطح آب شور را به ترتیب ۲۰ سانتی متر و ۲/۵ سانتی متر برای آب شیرین کن های شیب دار تعیین نمودند.

در میان دستگاه های اشاره شده نمی توان بهترین گزینه را پیشنهاد نمود، بلکه انتخاب دستگاه مناسب تابع شرایطی مانند ساخت و کنترل آسان، در دسترس بودن قطعات دستگاه، کیفیت آب به دست آمده، پیشرفته بودن روش به کار گرفته شده، مناسب بودن دستگاه با توجه به

¹ phase change material: PCM

بی‌اثر بودن شیمیایی، سازگار بودن با مواد فلزی، فشار بخار کم به هنگام ذوب و هزینه‌ی مناسب استفاده شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی تعدادی از مواد تغییر فازدهنده

ویژگی‌های مواد	نمک گلوبر [۷ و ۲۲]	استناریک اسید [۲۳]	پارافین واکس [۲۴]
دمای ذوب (°C)	۳۲	۵۲	۴۰-۶۰
گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	۲۵۱	۱۶۹	۲۲۶
چگالی جامد/مایع (kg/m ³)	۱۴۶۰/۱۱۳۳۰	۹۶۵-۸۴۷	۸۱۸-۷۶۰
رسانایی گرمایی (W/m°C)	۲/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۴
ظرفیت گرمایی ویژه (kJ/kg°C)	۱/۷۲-۳/۳	۱/۵۹	۲/۹۵-۲/۴۵

۲-۲- شرح دستگاه آزمایشگاهی

در این تحقیق، از یک دستگاه آب‌شیرین‌کن مستقیم و یک مرحله‌ای گونه‌ی پلکانی استفاده شده است. در این دستگاه آب از بالای پلکان وارد دستگاه می‌گردد و سپس گرم شده، و بخشی از آن تبخیر شده و بقیه آن به کمک مکان‌های تعبیه‌شده جمع‌آوری و بیرون برده می‌شود. آب‌شیرین‌کن پلکانی به دلیل جهت‌گیری مناسب نسبت به پرتوهای رسیده از سوی خورشید و ضخامت کم آب بر روی سطح جذب‌کننده^۱، مورد توجه قرار گرفته است. این امر موجب رشد سریع دمای آب‌شور و افزایش میزان تبخیر می‌گردد.

با انتخاب پله‌های افقی و قراردادن آن به گونه‌ی پی‌درپی، ساختار پلکانی صفحه‌ی جذب‌کننده را به وجود آورده و زاویه‌ی مناسب دستگاه با توجه به طول و عرض جغرافیایی هر منطقه برای جذب بیشتر پرتوهای خورشید به کمک صفحه‌ی جذب‌کننده تعیین می‌گردد. Souza و همکاران [۲۵] بررسی کردند که صفحه‌ی جذب‌کننده زمانی بیشترین میزان پرتوهای مستقیم خورشید را دریافت می‌نماید که شیب آن در هرماه تنظیم گردد. با توجه به ساخت پلکان به صورت افقی بر اساس زاویه‌ی بهینه، امکان تغییر زاویه در هرماه موجود نمی‌باشد، در نتیجه، باید بهترین زاویه در طول سال را تعیین نمود. Singh و Tiwari [۲۶] نشان دادند که بهترین زاویه برای دریافت حداکثر شدت تابش خورشید به صفحه‌ی جذب‌کننده در طول سال زمانی حاصل می‌گردد که زاویه‌ی صفحه یا دستگاه معادل با عرض جغرافیایی منطقه‌ی مورد نظر در نظر گرفته شود. بنابراین، شیب در نظر گرفته‌شده برای ساخت دستگاه، نزدیک به ۳۰ درجه در نظر گرفته شد که برابر با عرض جغرافیایی شهر بندر ماهشهر واقع در جنوب غرب ایران می‌باشد. با توجه به شیب بهینه برای ساخت دستگاه، نسبت طول هر پلکان با توجه به شمار آن‌ها به ترتیب ۵ و ۳ سانتی‌متر به دست آمد. بنابراین، صفحه‌ی جذب‌کننده به صورت پلکان‌های افقی پی‌درپی و بر اساس نسبت اشاره‌شده ساخته شد. تصویر واقعی صفحه‌ی جذب‌کننده و مخزن ذخیره گرمایی و همچنین طرحواره کلی دستگاه آزمایشگاهی با ارائه ابعاد در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

موقعیت مکانی، قابلیت افزایش ظرفیت دستگاه، شرایط آب و هوایی و غیره می‌باشد [۱۶].

در این تحقیق از یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با به‌کارگیری ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به‌عنوان فرآیندی نوین و سازگار با محیط زیست، می‌توانند به‌عنوان راهکاری مناسب در راستای توسعه پایدار و تأمین آب مورد نیاز، جهت نمک‌زدایی از آبهای لب شور و شور در کشور مورد استفاده قرار گیرند. این سیستم نسبت به سایر فرآیندهای متعارف آب شیرین‌کن (شامل نانو فیلتراسیون، اسمز معکوس، تقطیر چند مرحله‌ای و غیره) دارای فناوری ساده‌تر، ارزاتر و دارای سازگاری بیشتر با شرایط اقلیمی ایران می‌باشد. لذا این تحقیق به بررسی ضرورت استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی برای تأمین آب مورد نیاز صنایع، کشاورزی و جوامع کوچک (شامل نقاط کم جمعیت و روستاها) می‌پردازد.

مزایای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی نسبت به سایر سیستم‌های تقطیری به شرح زیر است:

- تولید آب خالص
- عدم نیاز به تجهیزات جانبی برای راه اندازی
- عدم نیاز به منابع انرژی متداول
- عدم نیاز به اپراتور متخصص برای راه اندازی و نگهداری
- امکان پذیر بودن ساخت و تعمیر محلی
- هزینه پایین

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی در مناطق گرم که نیاز آب کمتر از ۳ مترمکعب در روز می‌باشد، کارایی دارند. به دلیل هزینه‌ی بالای انتقال آب و همچنین هزینه‌های بالای تأمین سوخت، استفاده از این روش توجیه‌پذیر می‌باشد [۱۷]. روش آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی هم از روش‌های کارآمد در شیرین‌سازی آب است که در مقالات معتبر سال‌های اخیر به کرات مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۱۸-۲۱]. ضمناً استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در این مقاله از موضوعات جدیدی می‌باشد که امروزه برای افزایش راندمان انتقال گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- معرفی مواد و روش انجام آزمایشها

۲-۱- معرفی مواد

در دستگاه آب‌شیرین‌کن ساخته شده در این تحقیق تلاش بر این است که دستگاه بتواند در نبود خورشید نیز به تولید آب شیرین بپردازد. در نتیجه، با اقدام به ایجاد یک مخزن ذخیره‌ی گرمایی، بخشی از تابش دریافتی از خورشید در طول روز ذخیره شده و در نبود خورشید از گرمای ذخیره‌شده برای تولید آب شیرین استفاده می‌گردد. یکی از عوامل اساسی در انتخاب این روش، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده یا PCM ها می‌باشد زیرا این مواد قابلیت ذخیره‌ی انرژی در طول روز و تخلیه‌ی انرژی در نبود خورشید را دارا می‌باشند. در دستگاه‌های خورشیدی با توجه به بازه‌ی پایین دمایی باید موادی را انتخاب نمود که در بازه‌ی دمایی کم میزان انرژی بیشتری ذخیره نمایند. جدول ۱ خواص فیزیکی تعدادی از مواد تغییر فازدهنده که به‌عنوان ماده‌ی ذخیره‌کننده‌ی انرژی در دستگاه‌های خورشیدی استفاده می‌شوند را نشان می‌دهد. در این تحقیق از نمک گلوبر به‌عنوان ماده‌ی تغییر فازدهنده در آب‌شیرین‌کن به دلیل دمای ذوب مناسب،

¹ absorber



شکل ۳- تصویری از دستگاه آب شیرین کن پلکانی ساخته شده

پخش آب شور بر روی سطح تبخیرکننده، یکی از عوامل مؤثر بر بازده ترمودینامیکی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی می باشد. مناسب ترین چگونگی پخش به گونه ای می باشد که آب شور ورودی بر روی سراسر بخش های سطح جذب کننده جریان یابد که این امر موجب افزایش میزان انتقال گرما می گردد. از مسائل اساسی در بازده گرمایی صفحه ای جذب کننده، دریافت بیشترین انرژی ممکن و انتقال آن به آب می باشد. پخش نامناسب آب موجب خشک ماندن برخی از بخش های صفحه ای جذب کننده شده که در این حالت میزانی از انرژی دریافت شده توسط صفحه، به دلیل عدم حضور آب بر روی آن در بخش های خشک، هدر خواهد رفت.

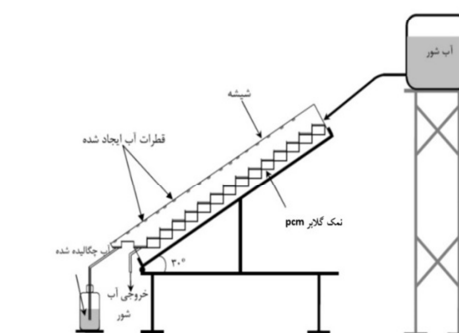
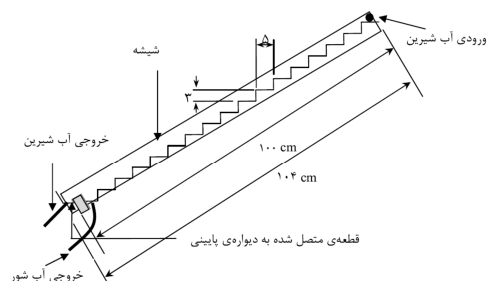
همچنین، اختلاف دمای بالا بر روی سطح میان نقاط خشک و نقطه ای که در معرض جریان آب هستند، موجب تغییر شکل سطح گشته که این امر منجر به کانالیزه شدن جریان آب می شود. پخش نامناسب جریان آب شور ورودی بر روی صفحه ای جذب کننده به عواملی مانند ویژگی های سطحی صفحه، چگونگی پخش آب، هندسه ای صفحه، تراز بودن دستگاه، نرخ جریان آب ورودی و خطاهای انسانی بستگی دارد.

با توجه به بالا بودن نیروی پیوستگی بین مولکول های آب، سطوح رایج استفاده شده دارای خاصیت آبگریزی می باشند که این امر منجر به زمان ماند بسیار کوتاه آب بر روی سطوح افقی می شود. در این حالت آب موجود بر روی سطوح افقی، با ایجاد نخستین مسیر خروجی (کانال) به پله ای پایین تر، به سرعت تخلیه شده که در نتیجه آب ورودی به پله با توجه به کانالیزه شدن جریان در مدت زمان کوتاهی از روی سطح افقی پله عبور کرده و به پله ای بعدی منتقل می شود. با کانالیزه شدن جریان بر روی سراسر پله ها، در نهایت زمان ماند آب در دستگاه کوتاه شده و بخش هایی از سطح تبخیر خشک مانده که موجب کاهش میزان انتقال گرما بین سطح و آب گشته و سبب کاهش نرخ تولید بخار و سرانجام کاهش میزان آب شیرین تولید شده خواهد شد. ساخت و نصب این گونه دستگاه ها نیز همواره با خطای انسانی روبرو بوده و کانالیزه شدن جریان در آن ها به شرایط عملیاتی بسیار حساس می باشد و برقراری یک حالت دلخواه امری دشوار می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ساخت آب شیرین کن های خورشیدی به صورت پلکانی

همه ی درزهای دستگاه با کمک چسب مرزا آب بندی شد و در لبه ی هر پلکان نیز بندهایی به طول ۵۹ سانتی متر و عرض ۵/۲ سانتی متر قرار داده شد. این بندها به ارتفاع ۰/۵ سانتی متر بالاتر از لبه ی پله ها قرار گرفت. با ساخت کامل دستگاه، پوشش شیشه ای بر روی دستگاه قرار داده شد و از چسب برای آب بندی مناسب شیشه استفاده شد. این نکته لازم به اشاره است که این نمونه آب شیرین کن پلکانی خورشیدی دارای قابلیت نصب مخزن گرمایی و توانایی جدا کردن آن از مخزن گرمایی می باشد. شکل ۳ تصویر واقعی دستگاه آب شیرین کن پلکانی ساخته شده را نشان می دهد.



شکل ۱- نمای از مخزن ذخیره گرمایی و صفحه جذب



شکل ۲- نمای سرهم بندی بخش های مختلف دستگاه از کنار

حسگرها در نقاط مختلف دستگاه قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌شد. داده‌ها هر یک ساعت مشاهده و ثبت می‌شد. در دستگاه با مخزن ذخیره‌ی گرمایی دو حسگر بر روی پلکان‌های سوم و چهاردهم صفحه-ی جذب‌کننده، یک حسگر درون مخزن گرمایی در مرکز مخزن قرارداد شده. برای اندازه‌گیری دمای شیشه نیز از یک ترموکوپل استفاده شد. همچنین، دمای محیط با کمک یک حسگر گرمایی اندازه‌گیری می‌شد. همچنین، یک سری آزمایش‌های اولیه برای تعیین کیفیت آب‌شور وارد شده به دستگاه و آب چگالیده شده انجام شد. در این آزمایش‌ها، رسانایی الکتریکی^۳، خاصیت اسیدیته^۴، کل سختی^۵ و کل املاح محلول^۶ اندازه‌گیری شد.

پارامترها و متغیرهایی که در این آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از:

- ۱) دمای محیط (T_a)
- ۲) زمان
- ۳) میزان جریان آب شیرین خروجی ($m^{\circ}wo$)
- ۴) دمای سطح جذب‌کننده (T_{ab})
- ۵) دمای شیشه (T_g)
- ۶) دمای ماده‌ی ذخیره‌کننده انرژی گرمایی ($T_{pm}(l)$)
- ۷) میزان تولید روزانه‌ی آب شیرین^۷

ذکر این نکته ضروری است که پارامتر میزان شدت تابش خورشید اگر چه در طول روز متغیر است اما تغییرات آن در روزهای مختلف یکسان فرض شده است. با اطلاعاتی که از ایستگاه هواشناسی منطقه دریافت شد محدودی تغییرات شدت انرژی بر حسب W/m^2 در طول روز متغیر بوده و همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در منطقه مورد مطالعه از صفر تا حدود $850 W/m^2$ تغییر می‌کند. آزمایش‌های این تحقیق در بازه‌ی زمانی کوتاهی در چند روز متوالی و همگی در یک ساعت مشخصی از روز (از ۱۰ صبح تا ۱۸ عصر) انجام شد که در این روزها وضعیت جوی یکسانی حاکم بوده است. بعد از انجام آزمایش‌ها، میزان شدت تابش خورشیدی در آن روزها از ایستگاه هواشناسی منطقه دریافت گردید. نتایج شدت تابش خورشیدی نشان داد که در اکثر روزهای کاری، مقدار شدت تابش خورشیدی دارای تغییرات یکسان بوده و حداکثر اختلاف ۵٪ در میزان شدت تابش خورشیدی در روزهای مختلف آزمایش وجود داشت. البته آزمایش‌هایی که در روزهایی با شدت تابش متفاوت انجام شدند (با اختلاف بیشتر از ۵٪) در نتایج نهایی گزارش نشدند. لذا می‌توان این‌گونه فرض نمود که در کلیه‌ی نتایج ارائه شده در این مقاله، شدت تابش خورشیدی در بازه‌ی زمانی کارکرد دستگاه (از ۱۰ صبح تا ۱۸ عصر) در همه‌ی روزهای مختلف یکسان بوده است که مقدار متوسط آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

همواره با مشکل پخش نامناسب جریان آب همراه بوده که این پدیده، مشکلی اساسی می‌باشد.

بنابراین، برای استفاده از بیشینه‌ی سطح تماس در دسترس و افزایش انتقال گرما از سطح به آب و میزان تبخیر بیشتر و پیشگیری از کانالیزه شدن جریان آب، یک راهکار موجود، تغییر در ساختار پلکان، برای هدایت آب در مسیرهای دلخواه می‌باشد. بنابراین، از یک سری بند به ارتفاع ۲/۵ میلی‌متر در لبه‌ی هر پله استفاده شد. در انتهای هر پلکان برای انتقال آب به پله بعدی آبراهی به‌اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر موجود می‌باشد.

برای کاهش هدر رفت گرما از دستگاه، قاب بیرونی آن نیز با استفاده از رنگ سیاه، رنگ‌آمیزی شد. استفاده از رنگ سیاه برای قاب بیرونی دستگاه موجب افزایش گرمای آن می‌گردد. به‌این‌ترتیب اختلاف دمای بین دستگاه و قاب بیرونی آن کاهش یافته و کاهش این میزان موجب کاهش میزان هدر رفت گرمایی دستگاه خواهد شد.

چهارپایه‌ی فلزی به ارتفاع ۲ متر برای قرار گرفتن مخزن آب ورودی^۱ بر روی آن در پشت دستگاه و مخزن آب‌شور بر روی پایه قرارداد شده. در هنگام کاهش سطح آب مخزن، به میزان مشخص شده جریان جبرانی به مخزن برقرار می‌شد و با کمک این امر، سطح آب موجود در مخزن کنترل می‌گردید. بر روی بخش پایین مخزن آب، در فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر از کف مخزن یک خروجی برای تأمین آب ورودی به دستگاه تعبیه شد. ارتفاع به وجود آمده از کف موجب می‌شود که ذرات درشت یا معلق در آب ته‌نشین شده و وارد لوله‌های ورودی یا آب‌شیرین‌کن نگردد و از گرفتگی لوله‌ها و تشکیل رسوب پیشگیری شود. در طول آزمایش، آب چگالیده شده در هر ساعت گردآوری و مقدار آن اندازه‌گیری شد.

میزانی از گرمای جذب‌شده با کمک آب و صفحه‌ی جذب‌کننده صرف تبخیر جریان آب درون دستگاه می‌گردد. آب تبخیر شده بر روی سطح درونی شیشه چگالش می‌یابد. پوشش شیشه‌ای هنگام چگالش بخار آب بر روی سطح درونی آن انرژی را به‌عنوان گرمای نهان تبخیر دریافت نموده و با انتقال آن به محیط موجب چگالیده شدن بخار آب می‌گردد. آب چگالیده شده توسط نیروی جاذبه به درون کانال‌های گردآوری آب شیرین در بخش پایینی پوشش شیشه‌ای انتقال می‌یابد.

۲-۳- روش انجام آزمایش‌ها

همان‌گونه که اشاره شد، دستگاه آب‌شیرین‌کن پلکانی یک‌بار با مخزن و یک‌بار بدون مخزن ذخیره‌ی گرمایی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. درون مخزن گرمایی نیز از نمک گلوبر پر شد. آزمایش‌ها در روزهای گوناگون با شرایط عملیاتی گوناگون انجام شد.

در این مرحله از آزمایش‌ها چگونگی کارکرد دستگاه در روزهای گوناگون با دبی‌های گوناگون آب‌شور ورودی مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا یک سری آزمایش در ۸ روز با دبی‌های متفاوت آب‌شور ورودی به دستگاه انجام شد. دبی‌های آب ورودی به دستگاه برابر ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، و ۱۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها به شیوه‌ی یکسان از ساعت ۱۰ صبح آغاز و در ساعت ۱۸ پایان پذیرفت. داده‌های دمایی موردنیاز توسط یک سری حسگر^۲ گرمایی که این

³ Electro-conductivity

⁴ pH

⁵ Total Hardness = TH

⁶ Total Dissolved Salts = TDS

⁷ Total Productivity

¹ Feed water

² Sensor

$$I(t)\tau_g\alpha_w + h_1(T_p - T_w) = h_2(T_w - T_g) + \left(\frac{m_w c_w}{A_w}\right)\left(\frac{dT_w}{dt}\right) \quad (3)$$

که در این رابطه h_1 ضریب انتقال گرمای جابجایی از صفحه جذب به آب شیرین می‌باشد که مقدار آن از [۲۷] به دست می‌آید.

معادله موازنه انرژی برای صفحه جذب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I(t)\tau_g\tau_w\alpha_p = h_1(T_p - T_w) + \left(\frac{k_{pcm}}{x_{pcm}}\right)(T_p - T_{PCM}) + \left(\frac{m_p c_p}{A_p}\right)\left(\frac{dT_p}{dt}\right) \quad (4)$$

که در این رابطه، k_{pcm} ضریب رسانایی گرمایی ماده ذخیره کننده گرمایی و x_{pcm} ضخامت ماده ذخیره کننده گرمایی می‌باشد.

ماده تغییر فاز دهنده، انرژی گرمایی را از صفحه جذب ذخیره می‌کند و مقدار کمی از گرما را از پایین دستگاه به محیط اطراف انتقال می‌دهد. مطابق این بحث، موازنه انرژی بر روی ماده تغییر فاز به صورت زیر خواهد بود:

$$\left(\frac{k_{PCM}}{x_{PCM}}\right)(T_p - T_{PCM}) = \left(\frac{k_{ins}}{x_{ins}}\right)(T_{PCM} - T_a) + \left(\frac{M_{equ}}{A_p}\right)\left(\frac{dT_{PCM}}{dt}\right) \quad (5)$$

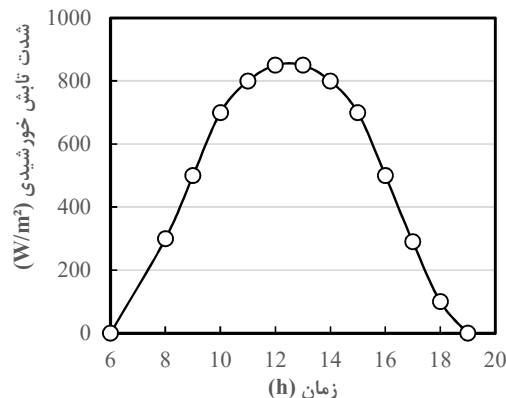
که در این رابطه، k_{ins} ضریب رسانایی گرمایی و x_{ins} ضخامت ماده عایق را مشخص می‌کند. همچنین M_{equ} ظرفیت گرمایی ماده ذخیره گرمایی می‌باشد که در فازهای مختلف PCM در طول عملیات ارایه می‌شود.

برای دستگاه بدون ماده ذخیره گرمایی، معادله موازنه انرژی برای صفحه جذب به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I(t)\tau_g\tau_w\alpha_p = h_1(T_p - T_w) + U_b(T_p - T_a) + \left(\frac{m_p c_p}{A_p}\right)\left(\frac{dT_p}{dt}\right) \quad (6)$$

که در این رابطه، U_b ضریب هدر رفت گرمایی می‌باشد که مقدار آن را Velmurugan [۲۸] برابر $14 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ گزارش داده است.

سایر معادلات موازنه انرژی طبق معادلات مربوط به دستگاه با مخزن ذخیره انرژی در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقادیر ثابت‌هایی همچون ضرایب جذب α_g ، α_p و α_w و همچنین ضرایب عبور τ_g و τ_w و دیگر مقادیر ثابت از مراجع [۲۷] و [۲۹] اخذ شده‌اند. برای حل معادلات بالا نیاز به یک برنامه رایانه‌ای برای محاسبه دماهای شیشه، آب، صفحه جذب و ماده ذخیره گرمایی می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار $I(t)$ در معادلات فوق طبق مدل ارائه شده توسط Morcos [۳۰] محاسبه می‌شود. همچنین از نرم‌افزار MATLAB برای حل مدل ریاضی استفاده شده است.



شکل ۴- مقدار میانگین شدت تابش خورشیدی در روزهای مختلف انجام آزمایش

۳- مدلسازی

مدل ریاضی زیر به منظور بررسی عملکرد گرمایی دستگاه مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل می‌توان دماهای مربوط به پوشش شیشه، آب تصفیه شده، صفحه جذب و PCM دستگاه آب شیرین کن خورشیدی را با حل معادلات موازنه انرژی ارزیابی کرد.

فرضیات این مدل به شرح ذیل می‌باشند:

- هیچ گونه نشتی هوای اشباع از دستگاه وجود ندارد.
- هدر رفت گرمایی از دیواره دستگاه ناچیز می‌باشد.
- دمای آب بر روی صفحه جذب ثابت فرض می‌شود.
- هیچ گونه انتقال گرمایی در لایه‌های PCM وجود ندارد.
- برای سادگی کار فرض می‌شود هیچ گونه گرادیان دمایی در سراسر PCM وجود ندارد زیرا ضخامت کمی دارد.

برای دستگاه با ماده ذخیره گرمایی، معادلات حاکم به شرح زیر می‌باشند. موازنه انرژی بر روی پوشش شیشه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$I(t)\alpha_g + h_2(T_w - T_g) = h_{3-g}(T_g - T_a) + \left(\frac{m_g c_g}{A_g}\right)\left(\frac{dT_g}{dt}\right) \quad (1)$$

که برای تعیین ضریب انتقال گرمای کلی (h_2) از سطح آب به شیشه، مجموع ضرایب انتقال گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$h_2 = h_{rwg} + h_{ewg} + h_{cwg} \quad (2)$$

انتقال گرمای کلی در درون دستگاه از سطح آب شور به شیشه به سه صورت تابشی، جابجایی و تبخیر صورت می‌پذیرد که جابجایی و تبخیر وابسته به یکدیگر و مستقل از انتقال گرمای تابشی می‌باشند. برای محاسبه ضریب انتقال گرمای جابجایی از سطح آب به شیشه h_{ewg} از رابطه Dunkle که توسط Tiwari [۲۷] ارائه شده است، استفاده گردید.

انرژی حاصل شده از آب شیرین در دستگاه برابر است با انرژی هدر رفت خورشیدی توسط انتقال گرمای جابجایی بین آب و شیشه، انتقال گرمای تبخیر بین آب و شیشه، انتقال گرمای تابشی بین آب و شیشه و انرژی به دست آمده توسط آب شیرین:

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی نتایج کارکرد دستگاه آب شیرین کن پلکانی

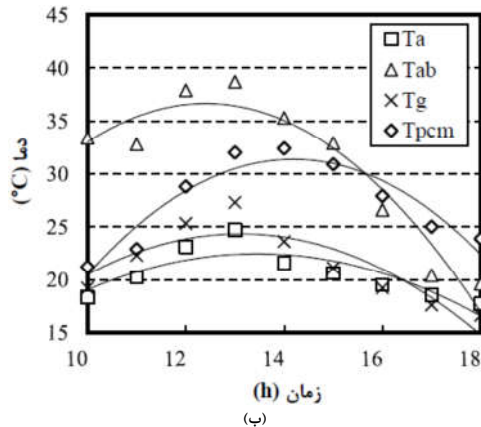
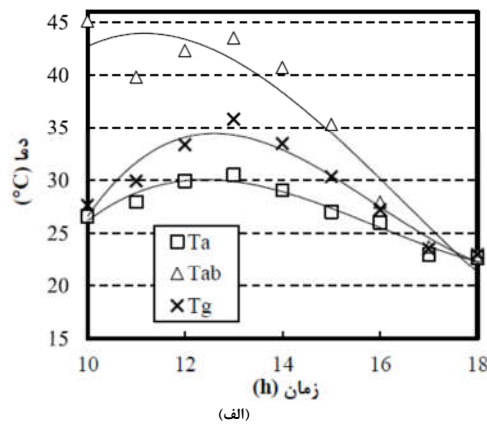
با مخزن و بدون مخزن گرمایی

آزمایش‌های موردنظر برای مقایسه‌ی کارکرد دستگاه ساخته‌شده انجام شد و چگونگی کارکرد دستگاه بدون مخزن گرمایی با نتایج حاصل از کارکرد دستگاه با مخزن گرمایی مقایسه شد. لازم به اشاره است که داده‌های مربوط به دستگاه بدون مخزن گرمایی با ^۱WLHTESS و داده‌های مربوط به دستگاه با مخزن گرمایی با ^۲LHTESS مشخص شده است. آزمایش‌ها در روزهای مختلف و در شرایط آب و هوایی مختلف تکرار شده اند. بدیهی است عوامل محیطی بر نتایج حاصل از آزمایش‌ها تأثیرگذار می‌باشد. از عوامل محیطی می‌توان به میزان تابش خورشیدی، سرعت وزش باد و دمای محیط اشاره نمود. تغییر دمای بخش‌های گوناگون دستگاه برای دستگاه بدون مخزن گرمایی و دستگاه با مخزن گرمایی به ترتیب در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است. در این دو شکل، نتایج مدسازی انجام شده برای محاسبه‌ی دمای قسمتهای مختلف دستگاه نیز ارائه شده است. اگر چه آزمایش‌های متعددی در شرایط متفاوت با دستگاه‌های بدون مخزن گرمایی و با مخزن گرمایی انجام شده است صرفاً نمونه‌ای از نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. روند تغییر متغیرها در دیگر آزمایش‌ها هم مشابه نتایج ارائه شده در این شکل بوده و صرفاً از لحاظ عددی تغییرات کمی داشته است که این تغییرات عمدتاً به خاطر تغییر در وضعیت آب و هوایی روزهای مختلف بوده است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است، دمای بخش‌های گوناگون دستگاه باگذشت زمان افزایش یافته تا به بیشینه‌ی مقدار خود در حوالی ظهر (ساعت ۱۳) برسد و پس از آن روند کاهشی خود را طی می‌نماید. همان‌گونه که دیده می‌شود، دمای شیشه در اوایل روز از دمای محیط بیشتر می‌باشد زیرا در حوالی ساعت ۱۰ صبح، شیشه در برابر پرتوهای خورشید قرار می‌گیرد و نرخ افزایش دمای شیشه سریع‌تر از دمای محیط می‌باشد. باگذشت زمان، سرعت افزایش دمای شیشه به دلیل هدر رفت گرمایی از شیشه به محیط کاهش می‌یابد و دمای آب به دلیل انتقال گرما از صفحه‌ی جذب‌کننده به آب و همچنین برخورد پرتوهای خورشید با سطح آن افزایش می‌یابد و دمای شیشه بیشتر می‌شود. دمای PCM نیز نخست شروع به افزایش نموده و برای مدتی ثابت مانده و سپس شروع به کاهش می‌کند. در نزدیکی ساعت ۱۰ صبح، به دلیل افزایش در میزان تابش خورشید، دمای سطح جذب‌کننده شروع به افزایش می‌نماید و دمای آن از دمای نمک گلوبر در مخزن گرمایی بیشتر می‌شود. به‌واسطه‌ی اختلاف دما، انتقال گرما از صفحه جذب‌کننده به مخزن گرمایی صورت می‌پذیرد و انرژی گرمایی به‌صورت گرمای محسوس ذخیره می‌گردد. ذخیره‌ی گرمایی به‌صورت گرمای محسوس ادامه می‌یابد تا PCM به نقطه‌ی ذوب خود می‌رسد. سپس، فرآیند ذخیره‌ی گرما به‌صورت گرمای نهان در دمای ثابت صورت می‌پذیرد. پس از ذوب کامل PCM فرآیند ذخیره گرمایی به‌صورت گرمای محسوس ادامه می‌یابد. همان‌گونه که در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است، باگذشت زمان دمای

نمک گلوبر افزایش یافته تا به نقطه‌ی ذوب می‌رسد که نزدیک به ۳۲ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. سپس دمای مخزن ثابت مانده و PCM شروع به ذوب شدن می‌نماید. هنگامی که دمای صفحه در نزدیک به ساعت ۱۶ از دمای مخزن گرمایی کمتر می‌شود فرآیند تخلیه‌ی گرمایی^۳ صورت می‌پذیرد. به‌روشنی دیده می‌شود که فرآیند ذوب، به‌صورت کامل انجام‌نشده است زیرا دمای PCM به هنگام شروع فرآیند تخلیه‌ی گرمایی ثابت بوده درحالی‌که در صورت ذوب کامل، دمای نمک گلوبر پس از ذوب کامل افزایش می‌یافت.

در شکل‌های ۵ (الف) و (ب) همچنین مشاهده می‌شود که نتایج مدل ارائه شده از انطباق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار بوده و می‌تواند در هر دو حالت با مخزن گرمایی و بدون مخزن گرمایی با خطای متوسط کمتر از ۱۲ درصد، داده‌های دمایی دستگاه را پیش‌بینی نماید.



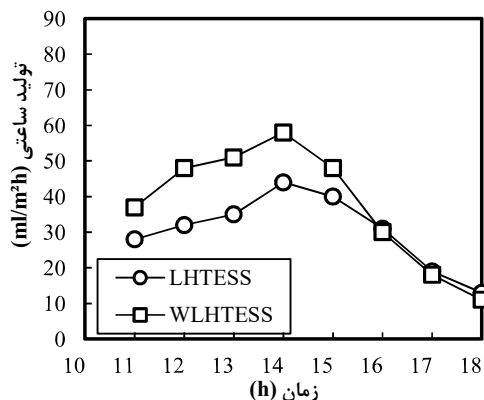
شکل ۵- نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی تغییر دمایی بخش‌های گوناگون دستگاه و میزان تولید آب شیرین با زمان (الف) برای آب شیرین کن بدون مخزن گرمایی (WLHTESS) (ب) برای آب شیرین کن با مخزن گرمایی (LHTESS)

شکل ۶ (الف) تا (د) به‌ترتیب چگونگی تغییر میزان تولید آب شیرین با زمان در دبی‌های آب شور مختلف شامل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ ml/min برای دستگاه با مخزن و بدون مخزن گرمایی را نشان

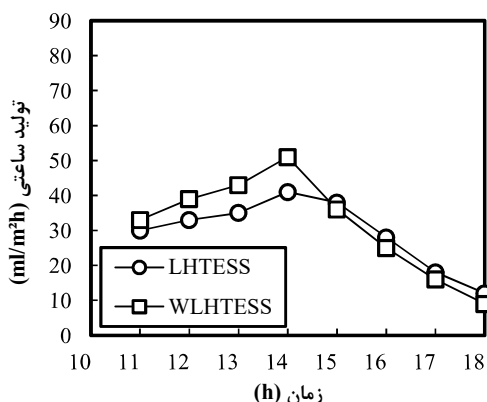
³ discharge process

¹ Without Latent Heat Thermal Energy Storage

² Latent Heat Thermal Energy Storage



(ج)

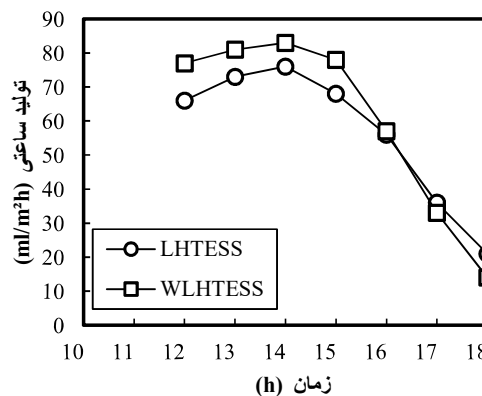


(د)

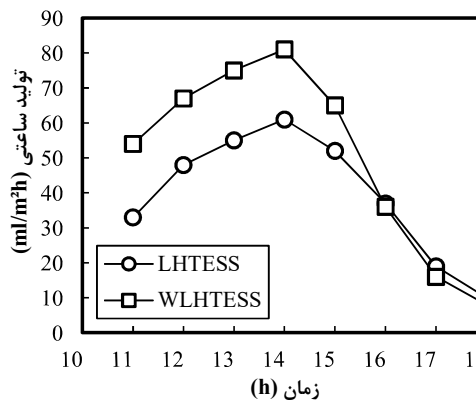
شکل ۶- تغییر میزان تولید آب شیرین با زمان برای دستگاه با مخزن گرمایی (LHTESS) و بدون مخزن گرمایی (WLHTESS) در دبی‌های مختلف آب شور (الف) ۵۰ ml/min (ب) ۷۵ ml/min (ج) ۱۰۰ ml/min (د) ۱۵۰ ml/min

چگونگی تغییر میزان روزانه تولید آب شیرین با تغییرات دبی ورودی آب شور در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان تولید روزانه در آب شیرین کن پلکانی در دبی‌های آب شور ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ ml/min و برای دستگاه بدون مخزن به ترتیب برابر با ۴۲۳، ۴۰۲، ۳۰۱ و ۲۵۲ ml/m² day می‌باشد و برای دستگاه با مخزن ذخیره انرژی به ترتیب برابر با ۳۹۶، ۳۱۵، ۲۴۲ و ۲۳۵ ml/m² day می‌باشد. این نکته قابل توجه می‌باشد که اگرچه میزان تولید در دستگاه با مخزن گرمایی در نبود خورشید بیشتر است اما در طول روز تولید کمتری را نسبت به دستگاه بدون مخزن گرمایی دارا می‌باشد. با افزایش میزان نرخ ورودی آب شور به دستگاه از میزان تولید روزانه آب شیرین کاسته شده زیرا با افزایش میزان نرخ آب شور ورودی به دستگاه، آب مدت زمان کمتری در برابر پرتوهای خورشید قرار می‌گیرد و با کاهش مدت زمان ماند آب درون دستگاه، زمان لازم برای انتقال گرما از صفحه به آب شور فراهم نمی‌گردد. در نتیجه، بیشترین میزان تولید در کمترین میزان ممکن دبی ورودی آب شور یعنی ۵۰ ml/min حاصل می‌گردد. البته این نکته قابل توجه می‌باشد که اگرچه بیشترین میزان تولید در کمترین میزان ورودی آب شور حاصل می‌شود اما همواره کمترین میزان دبی ورودی بهترین میزان نمی‌باشد زیرا نرخ‌های پایین آب ورودی، موجب پخش نامناسب آب بر روی صفحه در اثر تخریب و کانالیزه شدن

می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان تولید آب شیرین در دستگاه بدون مخزن گرمایی نسبت به دستگاه با مخزن گرمایی در زمان تابش خورشید بیشتر می‌باشد و این روند در زمان نبود خورشید (به هنگام نزدیک شدن به غروب آفتاب یا مواقع ابری) وارونه می‌گردد. این امر به دلیل این موضوع می‌باشد که در زمان تابش خورشید، بخشی از انرژی صرف بالابردن دمای PCM در آب شیرین کن با مخزن گرمایی می‌گردد و در نتیجه موجب کاهش میزان انتقال گرما از صفحه می‌گردد. با توجه به این که این آزمایش‌ها در آذر ماه انجام شده است حوالی ساعت ۱۵ تا ۱۶ عملکرد دستگاه با مخزن گرمایی در همه آزمایش‌ها بهتر از دستگاه بدون مخزن گرمایی شده است. نکته دیگری که در همه دبی‌های مختلف آب شور قابل ملاحظه می‌باشد این است که بیشترین میزان تولید، چه در دستگاه با مخزن گرمایی و چه در دستگاه بدون مخزن گرمایی، در ساعت ۱۴ رخ داده است که بالاترین دمای محیط ثبت شده است. اگر چه در این تحقیق، امکان ثبت نتایج در ساعات بعد از ۱۸ وجود نداشته ولی این احتمال وجود دارد که روند به وجود آمده در ساعات بعد از ۱۸ شدیدتر هم شده و بازده دستگاه با مخزن گرمایی روند رو به رشدتری نسبت به دستگاه بدون مخزن گرمایی از خود نشان بدهد.



(الف)



(ب)

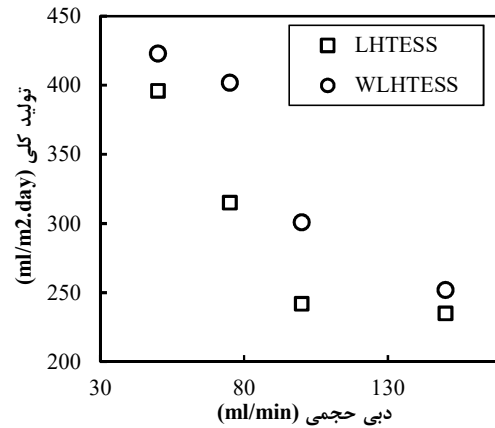
جدول ۲- کیفیت میزان آب شور ورودی و آب چگالیده شده با محدوده

مجاز آب آشامیدنی			
نمونه آزمایشگاهی	آب شور ورودی	آب شیرین	حداکثر مجاز استاندارد های ملی آب آشامیدنی [۲۲]
مقدار اسیدیته (pH)	۸/۳	۶/۶۷	۹ تا ۵/۶
مقدار رسانایی الکتریکی (μs/cm)	۲۳۰۰	۲۵	۱۵۰۰
مقدار سختی (TH) (ppm)	۶۰۰	۱۴	۵۰۰
مقدار املاح حل شده (ppm) (TDS)	۱۰۰۰۰	۲۱	۱۵۰۰

۵- نتیجه گیری

امروزه استفاده از انرژی های تجدید پذیر مانند باد، آب و انرژی خورشید با توجه به سازگاری آن ها با محیط زیست از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد. انرژی خورشید از منابع مهم انرژی است که در سال های گذشته با توجه به گران شدن سوخت های فسیلی توجه ویژه ای به آن شده است. استفاده از آب شیرین کن های پلکانی خورشیدی در تولید آب شیرین از آب های شور یک راهکار مناسب برای تهیه آب شیرین در نواحی خشک دوردست و همچنین مناطق روستایی می باشد. برای افزایش بازده این گونه آب شیرین کن تلاش شد با ارائه راهکارهای مناسب و اصلاح ساختار دستگاه، میزان تولید روزانه آب شیرین افزایش داده شود. ساخت صفحه جذب کننده بر اساس زاویه بهینه و حذف پخش کننده آب شور درون دستگاه و استفاده از بند در لبه هر پله، استفاده از مخزن ذخیره گرمایی و همچنین ساخت دستگاه با وزن کم از مزایای دستگاه آب شیرین کن ساخته شده در این تحقیق می باشد. ساخت پلکان به صورت افقی بر اساس شیب بهینه موجب جهت گیری مناسب صفحه نسبت به پرتوهای خورشید و دریافت بیشتر انرژی خورشید می گردد. استفاده از بند در لبه هر پلکان موجب پخش مناسب آب بر روی صفحه جذب کننده و همچنین افزایش زمان ماند و استفاده بهینه از سطح تبخیر می گردد. مخزن ذخیره گرمایی نیز موجب استفاده از انرژی گرمایی در نبود خورشید (پس از غروب آفتاب یا مواقع ابری) می گردد. استفاده از مجموعه عوامل اشاره شده در ساخت دستگاه موجب افزایش در میزان تولید آب شیرین و در نتیجه بازده دستگاه شده است. با اعمال این راهکارها دستگاه مورد نظر ساخته شد و در روزهای گوناگون مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه ساخته شده با مخزن گرمایی با دستگاه بدون مخزن گرمایی مقایسه شد و چگونگی کارکرد آن ها مورد مقایسه قرار گرفت. با نتیجه های به دست آمده از انجام آزمایش ها در روزهای گوناگون مشخص شد که در ساعاتی پس از غروب آفتاب و در روزهای ابری میزان تولید آب شیرین به کمک دستگاه با مخزن گرمایی به میزان چشمگیری از دستگاه بدون مخزن گرمایی بیشتر است ولی در ساعاتی آفتابی میزان تولید در دستگاه بدون مخزن گرمایی از دستگاه با مخزن گرمایی بیشتر است. اگرچه دستگاه با مخزن گرمایی

می گردد. بنابراین مناسب ترین حالت زمانی می باشد که دبی ورودی آب شور ورودی کلیه نقاط صفحه را بپوشاند.



شکل ۷- تغییر میزان تولید آب شیرین روزانه با تغییرات نرخ ورودی آب شور

رابطه ای (۷) نشان می دهد که راندمان انرژی در یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی برابر است با نسبت مقدار انرژی مفید استفاده شده برای شیرین سازی آب (میانگین انتقال گرمای تبخیر) به میانگین میزان تابش خورشید به واحد سطح شیبدار.

$$\eta_{th} = \frac{\sum \dot{m}_{ev} L_w}{A_p \int I(t) dt} \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه L_w مقدار گرمای نهان تبخیر آب می باشد که با توجه به دمای متوسط از روی جداول ترمودینامیکی به دست می آید و $I(t)$ شدت تابش خورشیدی در هر لحظه می باشد که مقادیر آن از ایستگاه هواشناسی منطقه اخذ گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، مقدار متوسط راندمان گرمایی سیستم آزمایشگاهی استفاده شده بدون استفاده از مخزن گرمایی برابر ۵۱٪ و با استفاده از مخزن گرمایی برابر ۵۹٪ می باشد.

در انتها برای بررسی کیفیت آب تولید شده توسط دستگاه، تعدادی آزمایش های اولیه بر روی نمونه ای از آب شور ورودی و همچنین آب شیرین تولید شده انجام شد. در آزمایش های انجام شده، میزان سختی آب، رسانایی الکتریکی، کل املاح محلول و همچنین میزان اسیدیته نمونه های مورد نظر اندازه گیری شد که نتیجه های به دست آمده در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به مقایسه کیفیت آب شیرین تولید شده و همچنین حداکثر مجاز استاندارد های ملی آب آشامیدنی [۲۲] مشاهده می شود که آب شیرین تولید شده در این روش از کیفیت مناسبی برای استفاده به عنوان آب آشامیدنی برخوردار می باشد.

¹ distributor

[20] Dashtban M., Farshchi Tabrizi F., Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage, *Desalination*, Vol. 279, pp. 415-422, 2011.

[21] Bouzaid, M., Ansari O., Taha-Janani M., Mouhsin N., Oubrek M., Numerical Analysis of Thermal Performances for a Novel Cascade Solar Desalination Still Design, *Energy Procedia*, Vol. 157, pp. 1071-1082, 2019.

[22] Karthick A., Murugavel K., Ramanan P., Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic module using phase change material, *Energy*, Vol. 142, pp. 803-812, 2018.

[23] El-Sebaei A.A., Al-Ghamdi A.A., Al-Hazmi F.S., Faidah A.S., Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1187-1195, 2009.

[24] Haji-Sheikh A., Eftekhari J., Lou D.Y.S., Some thermophysical properties of paraffin wax as a thermal storage medium", *3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference*, pp. 846-851, 1982.

[25] Souza T.R., Salvagnini W.M., Camacho J.L.P., Taqueda M.E.S., Performance of a solar energy powered falling film evaporator with film promoter, *Energy Conversion & Management*, Vol. 49, pp. 3550-3559, 2008.

[26] Singh H.N., Tiwari G.N., Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions, *Desalination*, Vol. 168, pp. 145-150, 2004.

[27] Tiwari G.N., Solar energy, Fundamentals, Designs, Modeling and Applications, CRC Press, New York, 2002.

[28] Velmurugan V., Kumar K.J.N., Haq T.N., Srithar K., Performance analysis in stepped solar still for effluent desalination, *Energy*, Vol. 34, pp. 1-8, 2009.

[29] El-Sebaei A.A., Al-Ghamdi A.A., Al-Hazmi F.S., Faidah A.S., Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1187-1195, 2009.

[30] Morcos V.H., Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Assiut, Egypt, *Renewable Energy*, Vol. 4, pp. 291-298, 1994.

امکان تولید در شب را دارا می‌باشد اما به دلیل تولید کمتر در هنگام روز، تولید روزانه‌ی آن میزان اندکی از دستگاه بدون مخزن گرمایی کمتر می‌باشد. در نتیجه استفاده از دستگاه با مخزن گرمایی به دلیل تولید بیشتر آب شیرین در مناطق نیمه‌ابری توصیه می‌شود در حالی که در مناطق آفتابی دستگاه بدون مخزن گرمایی به دلیل ساخت آسان و هزینه‌ی کمتر برتری دارد. همچنین، نتایج نشان داد که افزایش میزان نرخ ورودی آب شور موجب کاهش در میزان تولید آب شیرین دستگاه می‌شود در نتیجه بیشترین میزان تولید در کمترین نرخ ورودی آب شور به دست آمد.

۶- مراجع

[1] Gude G., *Renewable Energy Powered Desalination Handbook*, 1st ed. Butterworth-Heinemann, 2018.

[2] Galal S., Husseiny A.A., Status of desalination and technology in Middle East, *Desalination*, Vol. 20, pp. 217-221, 1977.

[3] Chaibi M.T., An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote areas, *Desalination*, Vol. 127, pp. 119-133, 2000.

[4] Fath H.E.S., Technical assessment of solar thermal energy storage technologies, *Renewable Energy*, Vol. 14, pp. 35-40, 1998.

[5] Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallag S., A review on phase change energy storage: Materials and applications, *Energy Conversion & Management*, Vol. 45, pp. 1597-1615, 2004.

[6] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.

[7] Radwan A.M., Transient performance of stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage, *Desalination*, Vol. 171, pp. 61-76, 2004.

[8] Rahim N.H.A., Utilization of new technique to improve the efficiency of horizontal solar desalination still, *Desalination*, Vol. 138, pp. 121-128, 2001.

[9] Fath H.S., Solar distillation: A promising alternative for water provision with free energy, simple technology and clean environmental, *Desalination*, Vol. 116, pp. 45-46, 1998.

[10] Hikmaet S.A., Egelioglu F., Atikol U., An experimental study on an inclined solar water distillation system, *Desalination*, Vol. 180, pp. 285-289, 2005.

[11] Tiwari G.N., Fundamentals, Designs, Modelling and Application, *Solar Energy CRC Press*, pp. 279-309, 2002.

[12] Soliman S.H., Effect of wind on solar distillation, *Solar Energy*, Vol. 13, pp. 403-415, 1972.

[13] Tiwari G.N., Thomas J.M., Khan E., Optimization of glass cover inclination for maximum yield in a solar still, *Heat Recovery Systems*, Vol. 14, pp. 447-455, 1994.

[14] Bahadori M.N., Edlin F.E., Improvement of solar stills by the surface treatment of the glass, *Solar Energy*, Vol. 14, pp. 339-352, 1973.

[15] Tiwari G.N., Garg H.P., Studies on various designs of solar distillation system, *Solar & Wind Technology*, Vol. 1, pp. 161-165, 1985.

[16] Jubran B.A., Ahmed M.I., Ismail A.F., Abakar Y.A., Numerical modelling of a multi-stage solar still, *Energy Conversion & Management*, Vol. 41, pp. 1107-1121, 2000.

[۱۷] دلفانی، ش.، پاسدار شهری، ه.، گرمی، م.، آب شیرین کن‌های خورشیدی، انتشارات مرکز تحقیقات مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۰

[18] Zhang Y., Sivakumar M., Yang S., Enever K., Ramezani-pour M., Application of solar energy in water treatment processes: A review, *Desalination*, Vol. 428, pp. 116-145, 2018.

[19] Sarhaddi F., Farshchi Tabrizi F., Aghaei Zoori H., Seyed Mousavi S.A.H., Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, Vol. 133, pp. 97-109, 2017.