https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.235951

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1405، ص ص 73- 83

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1403/03/17

تاریخ پذیرش: 404/08/28

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته

حسین امیری [1*]، غلامعباس احدی [2]

1- دانشیار، گروه پیل سوختی و هیدروژن، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

* کرمان، صندوق پستی ۱۱۷ - ۷۶۳۱۵، hosseinamiri2010@gmail.com ،h.amiri@kgut.ac.ir

چکیده

شیرین‌سازی آب‌های شور با استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی گزینه‌ای مطلوب و جذاب برای تولید غیرمتمرکز (در محل) و پایدار آب شیرین می‌باشد. اخیراً، مؤلف مقاله حاضر یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته را توسعه و به‌طور آزمایشگاهی موردمطالعه قرار داده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب این آب‌شیرین‌کن می‌باشد. بااین‌وجود این آب‌شیرین‌کن در طول شب به دلیل عدم وجود تابش خورشید، قادر به تولید آب شیرین نیست. برای حل این مشکل، ذخیره‌سازی انرژی خورشید در طول روز و استفاده از این انرژی در طول شب می‌تواند گزینه مناسبی باشد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده قابل انجام است. در مطالعه حاضر با تجهیز کردن آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته با ماده تغییرفازدهنده موم پارافین، به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر اضافه کردن این ماده بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن پرداخته‌شده است. بدین منظور دو آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته با ابعاد و مشخصات مشابه که یکی به‌صورت ساده و دیگری با اضافه کردن ماده تغییرفازدهنده به زیر صفحه جاذب ساخته‌شده به‌طور هم‌زمان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها در خردادماه 1400 و در شرایط آب و هوایی شهر کرمان انجام شده‌اند. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که استفاده از ماده تغییرفازدهنده به‌طور نسبی باعث بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن می‌شود و در شرایط طراحی و کاری مختلف بین 3/7 تا 12 درصد عملکرد آب‌شیرین‌کن را بهبود می‌دهد.

کلیدواژگان: آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار، ماده تغییرفازدهنده، موم پارافین، دبی آب، ضخامت شیشه

Experimental investigation of the effect of phase change (PCM) materials on the performance of an improved stepped solar still

Hossein Amiri [1*], GholamAbbas Ahadi [2]

1-Assistant Professor, Department of Fuel cell and Hydrogen, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences. Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences. Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

* *P.O.B.: 117-76315, Kerman, Iran*, hosseinamiri2010@gmail.com ,h.amiri@kgut.ac.ir

Received: 06 June 2024 Accepted: 19 November 2025

Abstract

Desalination of brackish water using solar still is a desirable and attractive option for decentralized and sustainable fresh water production. The author of the present study has recently developed and conducted experimental investigations on an improved stepped solar still. Their experimental results indicate a very good performance of this solar still. However, this unit cannot produce fresh water during the night due to the lack of sunlight. To overcome this problem, storing solar energy during the day and utilizing it at night can be a suitable solution, achievable through the use of phase change materials (PCM). In the present study, the effect of adding paraffin wax as a PCM to the absorber of the improved stepped solar still was experimentally investigated. For this purpose, two improved stepped solar still with identical dimensions and specifications were simultaneously tested, one being simple and the other equipped with the PCM. The experiments were conducted in June 2021 under the climatic conditions of Kerman city. The test results show that using the PCM relatively improves the performance of the desalination unit, enhancing its efficiency by 3.7% to 12% under different design and operating conditions.

Keywords: Improved Stepped Solar Still, PCM, Paraffin Wax, Flow Rate, Glass Thickness

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

1- مقدمه

آب برای همه موجودات زنده یک منبع حیاتی است و برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد. همچنین آب یک عنصر مهم در توسعه اقتصادی و رفاه است. محدود بودن منابع آب قابل شرب (شیرین) و افزایش روزافزون نیاز به آب باعث شده است یافتن منابع جدید برای تأمین آب شرب اجتناب‌ناپذیر باشد. با توجه به وجود آب‌شور در دریاها و اقیانوس‌ها و وجود آب‌های شور محلی یکی از راه‌حل‌های اساسی برای تأمین آب آشامیدنی برای مناطق دارای منابع محدود آب شیرین، شیرین‌سازی آب‌های شور می‌باشد. یک فرآیند شیرین‌سازی مطلوب فرآیندی است که دارای ویژگی‌هایی نظیر انرژی مصرفی پایین، هزینه کم، کیفیت و راندمان بالا، سهولت استفاده، عدم تولیدی آلودگی محیط زیستی (منبع انرژی سازگار با محیط‌زیست) باشد.

در حال حاضر روش‌های متداول تولید آب شیرین که بیشترین حجم تأمین آب شیرین را در جهان بر عهده دارند شامل اسمز معکوس (RO)[1]، نمک‌زدایی چندمرحله‌ای ناگهانی[2] و تقطیر چنداثره[3] هستند. روش‌های مختلف شیرین‌سازی آب به انرژی نیاز دارند که در حال حاضر عمدتاً این انرژی از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که با توجه به محدودیت این منابع و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌عنوان منابع پاک و پایدار انرژی، راه‌حل مناسبی برای رفع این معضل است. انرژی خورشیدی یکی از منابع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که تقریباً در همه نقاط جهان به‌جز نواحی قطبی (که شدت تابش کم است) در دسترس است.

آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به دلیل هزینه ساخت و نگهداری به نسبت، پایین و عملکرد سازگار با محیط زیست آن دستگاه‌های محبوبی برای تولید آب شیرین از آب‌شور هستند. با وجود این مزایا، آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ساده از میزان کم آب شیرین تولیدی در واحد سطح اشغال‌شده رنج می‌برند. با توجه به پایین بودن بازده آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، محققان سراسر جهان دائماً در تلاش برای بهبود خروجی تقطیر هستند. بنابراین فرصت‌ها و زمینه‌های زیادی برای تحقیق در مورد این نوع آب‌شیرین‌کن‌ها وجود دارد. راه‌حل‌های زیادی ازجمله تغییر در ساختار و استفاده از مواد مختلف جهت بالا بردن کارایی این دستگاه‌ها ارائه‌شده و منجر به نتایج خوبی هم شده است. یکی از راه‌های افزایش عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها، استفاده از مواد ذخیره‌سازی انرژی ازجمله مواد تغییر فازدهنده می‌باشد.

با توجه به اینکه منبع انرژی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تابش خورشید می‌باشد عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها وابسته به میزان تابش می‌باشد و در زمانی که تابش خورشید به دلیل وجود ابر و یا غروب خورشید (در طول شب) وجود نداشته باشد عملاً این سیستم‌ها کارایی خود را از دست می‌دهند. یکی از روش‌هایی که می‌تواند برای ادامه‌دار کردن تولید آب در طول شب انجام داد ذخیره‌سازی انرژی خورشید در طول روز و استفاده از این انرژی در طول شب می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی وجود دارد که شامل ذخیره‌سازی به روش گرمای محسوس، گرمای نهان، ترموشیمیایی یا ترکیبی از آن‌ها می‌شود. ذخیره‌سازی انرژی به روش گرمای نهان توسط مواد تغییرفازدهنده انجام می‌شود و به علت داشتن چگالی بالای انرژی و انجام گرفتن در دمای ثابت غالباً بر روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود [1]. مطالعات فراوانی در مورد استفاده از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مختلف و میزان تأثیر آن بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها انجام‌شده است. در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. دشتبان و همکاران [1] به بررسی میزان تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار پرداختند. آن‌ها از پارافین به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی گرمایی استفاده کردند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از ماده تغییرفازدهنده منجر به افزایش 31 درصدی آب شیرین تولیدی شده است. کابیل و همکاران [2] عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی را در حالت بدون و با ماده تغییرفازدهنده به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی گرمایی در اقلیمی مصر مورد تحقیق قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی با ماده تغییرفازدهنده 68 درصد بیشتر از آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای بدون ماده تغییرفازدهنده است. الهراشه و همکاران [3] نمک‌زدایی از آب‌شور توسط یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای تقویت‌شده با یک گردآورنده خورشیدی خارجی و مواد تغییرفازدهنده را در کشور اردن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با به‌کارگیری مواد ذخیره‌ساز انرژی تولید آب شیرین افزایش می‌یابد و 40٪ آن بعد از غروب خورشید اتفاق می‌افتد.

صفایی و همکاران [4] به بررسی تأثیر نانو ذرات اکسید گرافن اضافه‌شده به پارافین در بازده آب‌شیرین‌کن حوضچه خورشیدی پرداختند و با انجام آزمایش‌ها در شهر مشهد و در جولای تا اوت 2018 دریافتند که بازده آب‌شیرین‌کن با استفاده از مواد فوق 25 درصد افزایش می‌یابد. آمارلو و شفیعی [5] بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه خورشیدی را با استفاده از سیستم سرمایش تابشی در طول شب و به همراه به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده روغن نارگیل به‌عنوان ذخیره‌ساز انرژی تقطیر موردبررسی قرار دادند. آزمایش‌های انجام‌شده در شهر تهران و در ماه اوت 2017 نشان داد در بهترین طراحی (دو چگالنده و استفاده از سرمایش تابشی) بازده روزانه آب‌شیرین‌کن نسبت به طراحی پایه حدود 31 درصد بهبود عملکرد داشته است.

راجاسخارا و اسوارامورتی [6] به‌طور تجربی به مقایسه عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای در سه حالت الف) بدون استفاده از ماده تغییرفازدهنده، ب) با استفاده از ماده تغییرفازدهنده موم پارافین و ج) با استفاده از ماده تغییرفازدهنده نانوکامپوزیت (موم پارافین به همراه نانو ماده اکسید آلومینیوم) پرداختند. آن‌ها نشان دادند بازده آب‌شیرین‌کن در حالت بدون ماده تغییرفازدهنده، با ماده تغییرفازدهنده و با نانو مواد تغییرفازدهنده به ترتیب برابر 38 ٪، 40 ٪ و 45 ٪ می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن با اضافه شدن ماده تغییرفازدهنده می‌باشد. امارا و همکاران [7] در یک مقاله مروری به بررسی تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال[4] (استفاده از انرژی برای ایجاد حرکت سیال در درون آب‌شیرین‌کن) و غیرفعال[5] (گردش طبیعی سیال در درون سیستم) پرداختند نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های غیرفعال و فعال به ترتیب می‌تواند میزان آب شیرین تولیدی

[1] Reverse osmosis
[2] Multi-stage flash distillation
[3] Multi-Effect Distillation
[4] Active systems
[5] Passive systems

را تا 120 درصد و 700 درصد نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های مشابه و بدون ماده تغییرفازدهنده افزایش دهد.

تبریزی و همکاران [8] دو دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی آبشاری با و بدون ماده تغییرفازدهنده (به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی (PCM) را ساخته و به‌طور تجربی در شرایط آب و هوایی زاهدان موردبررسی قرار دادند نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط آسمان صاف (آفتاب) آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده به‌صورت جزئی عملکرد بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده دارد و در شرایط آسمان ابری آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده عملکرد بسیار بهتری دارد. به‌منظور بررسی میزان تأثیر طراحی‌های مختلف بر میزان تولید آب شیرین آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی، طوسی و همکاران [9] چهار حالت مختلف طراحی آب‌شیرین‌کن شامل حالت ساده، حالت همراه با ماده تغییرفازدهنده، حالت همراه با نانو ماده تغییرفازدهنده ترکیبی (جهت بالا بردن رسانایی گرمایی پارافین) و حللت همراه با نانو ماده تغییرفازدهنده ترکیبی تحت میدان مغناطیسی (جهت افزایش میزان انتقال حرارت) را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که حللت‌های دوم تا چهارم نسبت به حللت اول عملکرد بهتری دارند به‌طوری‌که آب‌شیرین‌کن در حالت‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب 37 درصد، 75 درصد و 98 درصد بیشتر از حالت اول آب شیرین تولید کرده است.

کته کار و دشموخ [10] در یک مقاله مروری مطالعات انجام‌شده تا سال 2020 میلادی درزمینهٔ به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی را مرور کردند. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از این مواد باعث بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها می‌شود. البته میزان این تأثیر وابسته به نوع آب‌شیرین‌کن به کار گرفته‌شده، شرایط عملکردی و محیطی می‌باشد. یادو و همکاران [11] تحقیقات انجام‌شده در مورد استفاده از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی نوع پلکانی (بدون لبه) و پلکانی لبه‌دار را مرور نمودند. عصاری و همکاران [12] به مرور مطالعات انجام‌شده بر روی به‌کارگیری از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند نتایج نشان داده است که عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی با مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان چه در سامانه‌های فعال و چه غیرفعال نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مشابه بدون مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان عملکرد و بهره‌وری بهتری دارند. شالابی و همکاران [13] به بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای استاندارد با صفحه جاذب دندانه‌ای که در زیر آن ماده تغییرفازدهنده موم پارافین تعبیه‌شده بود پرداختند. نتایج آن‌ها افزایش حدود 12 درصدی در میزان آب شیرین تولیدی در هنگام استفاده از ماده تغییرفازدهنده را نشان داد.

عبدالعزیز و همکاران [14] به بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای تک‌شیب که یک مخزن پارافین به عنوان ماده تغییرفازدهنده (جهت ذخیره انرژی) در زیر صفحه جاذب آن نصب‌شده و درون مخزن پارافین یک گرم‌کن الکتریکی با منبع انرژی خورشیدی (پنل فتوولتاییک) نصب‌شده، را مورد مطالعه و ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عملکرد آب‌شیرین‌کن جدید نسبت به نوع استاندارد در فصل بهار و تابستان به ترتیب 14 و 17 درصد بهتر بوده است. به‌منظور افزایش میزان آب شیرین تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای، القصیر [15] چندین تغییر را برای این آب‌شیرین‌کن پیشنهاد داد که شامل اضافه کردن دو کویل گرمایش آب مارپیچ در خارج از محفظه آب‌شیرین‌کن، نصب انعکاس‌دهنده‌های داخلی، نصب فن برای خروج بخار به سمت یک مبدل نصب‌شده در مخزن آب‌شور و استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌شد. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال این تغییرات باعث بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن به میزان 146 درصد می‌شود.

تأثیر نانوذرات نقره مخلوط شده با ماده تغییرفازدهنده موم پارافین بر عملکرد یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار به صورت تجربی توسط ساتیامورتی [16] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میزان آب شیرین تولیدشده با آب‌شیرین‌کن با موم پارافین و آب‌شیرین‌کن با نانوذرات نقره مخلوط شده در موم پارافین به ترتیب 66 و 75 درصد بیشتر از آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بدون ماده تغییرفازدهنده می‌باشد.

آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای شیب‌دار خورشیدی نمونه بهبودیافته آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای معمولی هستند که دارای مزایایی ازجمله دریافت بیشتر انرژی خورشیدی توسط صفحه جاذب، عمق کمتر آب و فاصله کم میان صفحه جاذب و پوشش شفاف هستند که به همین دلیل دارای نرخ تولید آب‌شیرین‌کن بیشتری نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای هستند. مطالعات زیادی در مورد بهبود هر چه بیشتر آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار خورشیدی انجام‌شده است. اخیراً یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار جدید با عنوان آب‌شیرین‌کن شیبدار بهبودیافته توسط امیری [17, 18] طراحی و ساخته‌شده است. در این آب‌شیرین‌کن یک چگالنده به‌صورت یک محفظه مکعب مستطیل شکل و به‌صورت موازی با صفحه جاذب به زیر آب‌شیرین‌کن اضافه‌شده است که از طریق دو کانال در بالا و پایین به محفظه تبخیر متصل شده است.

همان‌طور که در مطالعات ذکرشده بالا نشان داده شد یکی از روش‌هایی که می‌توان برای بالا بردن میزان تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده کرد به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده است که با ذخیره انرژی مازاد در طول روز، ادامه روند تولید آب شیرین در ساعاتی که نور خورشید وجود ندارد (شب) میسر می‌شود که می‌توانند باعث بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن شود. هرچند مطالعات فراوانی در مورداستفاده از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن خورشیدی مختلف و میزان تأثیر آن بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها انجام‌شده است. میزان تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها به پارامترهای زیادی من‌جمله طرح و نوع آب‌شیرین‌کن، شرایط و پارامترهای عملکردی و شرایط آب و هوایی (میزان تابش خورشید، دمای محیط، سرعت باد) وابسته است بنابراین میزان تأثیر این مواد بر عملکرد ثابت نبوده و باید برای هر نوع آب‌شیرین‌کن جداگانه مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به عملکرد بسیار خوب آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته پیشنهادی امیری [17, 18] نسبت به آب‌شیرین‌کن شیب‌دار مرسوم، در این تحقیق اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده پارافین بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن به‌صورت تجربی موردبررسی قرار می‌گیرد.

2- ساخت و آزمایش آب‌شیرین‌کن

در این بخش به نحوه ساخت و اضافه کردن مواد تغییرفازدهنده به آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته و همچنین نحوه انجام آزمایش‌ها و روش اندازه‌گیری پرداخته می‌شود.

2-1- شرح دستگاه

مطابق آنچه در قسمت مقدمه و مرور مطالعات گذشته در مورد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی و تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر بهبود عملکرد آن‌ها گفته شد، تلفیق آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته با مواد تغییرفازدهنده موضوعی جذاب می‌باشد. به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری این مواد در بهبود عملکرد این آب‌شیرین‌کن، در این تحقیق دو آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته که در یکی از آن‌ها ماده تغییرفازدهنده تعبیه‌شده است، مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است با توجه به وجود آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته که در مطالعه امیری [17, 18] مورد استفاده قرار گرفته بود عملاً یک آب‌شیرین‌کن جدید ساخته شده است و به دلیل وجود این آب‌شیرین‌کن، آب‌شیرین‌کن جدید نیز دقیقاً با همان ابعاد ساخته شده و فقط مواد تغییرفازدهنده در آن قرارگرفته است. در شکل 1 شماتیکی از آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته به همراه محفظه‌های نگهدارندِ ماده تغییرفازدهنده نشان داده‌شده است. در شکل 2 عکس‌هایی از صفحه جاذب و محفظه‌های نگهدارندِ تعبیه‌شده در آن از دو نمای بالا و روبه‌رو نشان داده است. این عکس‌ها پیش و پس از پر کردن محفظه‌های نگه‌دارنده ماده تغییرفازدهنده و پیش از مهروموم کردن درب محفظه‌های نگه‌دارنده مواد تغییرفازدهنده گرفته‌شده است. ابعاد کلی آب‌شیرین‌کن‌ها برابر 44×54×142 سانتی‌متر مکعب می‌باشد برای ساخت فریم یا قاب آب‌شیرین‌کن‌ها از قوطی 2cm×2cm و برای بدنه آن‌ها از ورق آهن گالوانیزه 1/5 و یا 0/7 میلی‌متر استفاده‌شده است. ابعاد صفحه جاذب آن‌ها 50×100 سانتی‌متر مربع می‌باشد. اختلاف بین عرض دستگاه و صفحه جاذب به منظور سادگی سرهم کردن دستگاه انجام‌شده است و بعد از نصب به منظور کاهش تلفات گرمایی از صفحه جاذب، این فاصله به‌وسیله عایق الاستومری پر شده است. اختلاف طول بین صفحه جاذب و دستگاه به علت وجود دو دهانه در بالا و پایین صفحه جاذب برای ارتباط بین محفظه چگالنده و محفظه تبخیر می‌باشد.

پلکان‌ها[1] یا ناودانی‌ها[2] در دستگاه آب‌شیرین‌کن نقش بسیار مهمی دارند چراکه آب‌شور با عبور از سطح آن‌ها به دمای موردنیاز جهت تبخیر رسیده و با عبور از پله‌ها به‌صورت یکی پس از دیگری به‌مرور تبخیر می‌شود، تا به پایین‌ترین پلکان رسیده و به خارج از آب‌شیرین‌کن هدایت شود. پلکان‌ها را می‌توان به‌صورت U شکل و یا V شکل ساخت. همان‌طور که در شکل 1 دیده می‌شود در این تحقیق صفحه جاذب با استفاده از یک ورق صاف که برش‌های نوار مانند از آهن گالوانیزه به عرض 7 سانتیمتر و طول 50 سانتی‌متر بر روی آن‌ها جوش داده‌شده است ایجادشده است. این روش ناودانی‌هایی V شکل را ایجاد می‌نماید.

پلکان‌ها از آهن گالوانیزه با ضخامت 1/5 میلی‌متر ساخته‌شده‌اند. با توجه به اینکه نرخ تبخیر به دمای آب و مدت‌زمان تماس با صفحه جاذب بستگی دارد در این تحقیق با ایجاد برش‌هایی (شکاف) متقاطع در انتهای ناودانی‌ها مسیر گردش آب بر روی صفحه جاذب به صورت مارپیچ درآمده‌است (شکل 1 و شکل 2). عبور آب از روی این پلکان‌ها، حوضچه‌هایی را بر روی صفحه جاذب ایجاد می‌نماید. در هر دو آب‌شیرین‌کن تعداد این حوضچه‌ها 14 عدد می‌باشد. جذب انرژی خورشید توسط این صفحه جاذب انجام می‌شود و به‌منظور افزایش ضریب جذب، این صفحه با رنگ سیاه روغنی پوشش داده‌شده است. در زیر صفحه جاذب محفظه مواد تغییرفازدهنده تعبیه‌شده است و در زیر و کنار محفظه‌های ماده تغییرفازدهنده یک لایه عایق الاستومتری استفاده‌شده است تا از انتقال حرارت(اتلاف حرارت) به محفظه کندانسور جلوگیری شود. کمترین ضخامت این لایه عایق 1 cm می‌باشد. بر روی عایق یک لایه ورق آهن گالوانیزه به ضخامت 1/5 میلی‌متر قرارگرفته است. بر روی این صفحه یک مبدل حرارتی به‌صورت یک لوله مارپیچ قرار گرفته است که آب‌شور ورودی در آن گردش می‌نماید.

برای ایجاد شرایط گلخانه‌ای که باعث به وجود آمدن بخار در محفظه تبخیر آب‌شیرین‌کن شود، از شیشه ساختمانی برای پوشش روی محفظه تبخیر پلکانی استفاده‌شده است. این پوشش شیشه‌ای علاوه بر عبور دادن پرتو خورشید، کار تقطیر قسمتی از بخار تولیدی را نیز انجام می‌دهد. از دو شیشه باضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متر در این تحقیق استفاده‌شده است. جهت جلوگیری از نشتی بخار آب به بیرون از آب‌شیرین‌کن، پوشش شیشه‌ای توسط درزگیر لاستیکی و پیچ‌های نگه‌دارنده آب‌بندی‌شده است. برای جلوگیری از نشت آب و بخار از قسمت‌های دیگر از چسب اکواریم استفاده‌شده است. سایر جزئیات طراحی این آب‌شیرین‌کن مشابه مرجع [17, 18] می‌باشد و برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله در اینجا آورده نشده است.

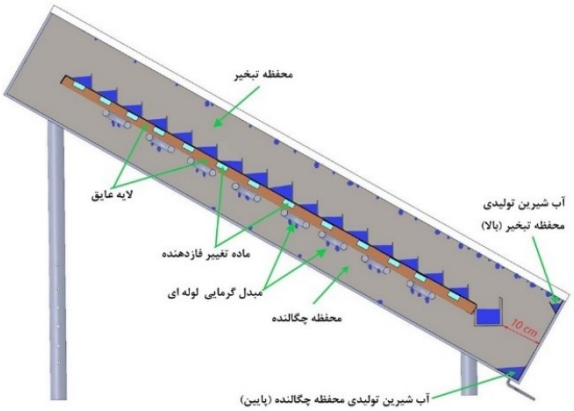
برای بهبود و ارتقا عملکرد آب‌شیرین‌کن شیب‌دار، مواد تغییرفازدهنده (PCM) به زیر صفحه جاذب اضافه‌شده است. مواد تغییرفازدهنده (PCM) موادی هستند که در دمای مشخصی بین حالت‌جامد و مایع تغییر فاز می‌دهند و می‌توانند گرمای نهان قابل‌توجهی را در طول فرآیند تغییر فاز بسته به جهت تغییر فاز ذخیره و یا آزاد کنند. از مزایای استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌توان به ذخیره‌سازی کارآمد گرما (ذخیره مقدار زیادی گرما در حجم نسبتاً کم)، عملکرد دما ثابت (در طول فرآیند تغییر فاز دما تقریباً ثابت می‌ماند)، قابلیت شارژ و تخلیه مکرر (می‌توانند پارها و پارها بدون تخریب شارژ و تخلیه شوند) اشاره کرد. انواع مختلفی از PCM ها وجود دارد. انتخاب ماده تغییرفازدهنده مناسب برای یک کاربرد خاص به عوامل مختلفی ازجمله دمای ذوب، گرمای نهان ذوب، واکنش‌پذیری یا خنثی بودن (پایداری)، چگالی، هدایت حرارتی و گرمای ویژه، میزان تغییر حجم در طی تغییرفاز، میزان هدایت حرارتی، میزان هزینه و میزان در دسترس بودن بستگی دارد. پارافین‌ها رایج‌ترین نوع PCM هستند و از موم‌های مشتق شده از نفت ساخته می‌شوند. آن‌ها دارای گرمای نهان ذوب بالا، پایداری حرارتی و سازگاری شیمیایی خوب و ارزان ، بی‌اثر و پایدار هستند[19]. به دلیل اینکه دمای ذوب موم پارافین (یا به‌طور ساده پارافین) در محدوده مورد نیاز برای آب‌شیرین‌کن‌های است و پارافین ارزان قیمت و در دسترس است و همچنین دارای گرمای نهان ذوب بالا و غیرسمی بوده و واکنش‌پذیری کمی(پایداری بالا) دارد در این تحقیق از پارافین به‌عنوان ماده تغییرفازدهنده استفاده‌شده است. مشخصات و خواص پارافین مورداستفاده در جدول 1 ارائه‌شده است.

در حالت کلی هرمقداری از ماده تغییرفازدهنده را می‌توان در آب‌شیرین‌کن استفاده کرد ولی برای کارکرد بهتر آب‌شیرین‌کن در حضور ماده تغییرفازدهنده، باید در انتخاب مقدار ماده تغییرفازدهنده دو نکته را مدنظر قرار داد. اولاً چنانچه میزان ماده تغییرفازدهنده کم باشد میزان حرارت ذخیره‌شده

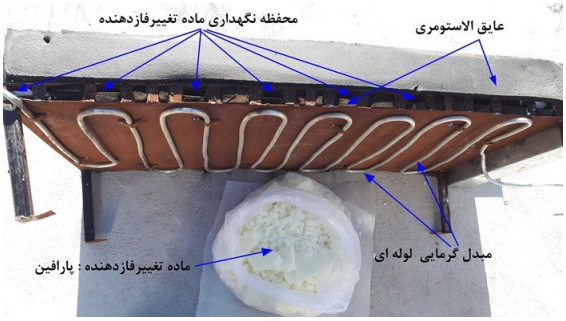
[1] Trays

[2] V shape stepped basins

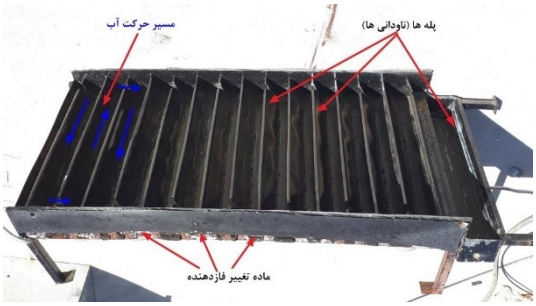
در آن کم خواهد بود و تأثیر آن بر عملکرد آب‌شیرین‌کن کم خواهد بود. دوما چنانچه مقدار ماده تغییرفازدهنده زیاد باشد عملاً مقداری از آن ذوب نشده و مقدار ذوب نشده عملاً تأثیری بر عملکرد آب‌شیرین‌کن نخواهد داشت ضمن اینکه هزینه ماده تغییرفازدهنده افزایش پیداکرده و همچنین فضای بیشتری برای ماده تغییرفازدهنده در نظر گرفته‌شده است. برای برآورد میزان پارافین مورد نیاز در این تحقیق از چند فرض ساده کننده استفاده‌شده است. اولاً با توجه به اینکه قسمتی از انرژی تابشی رسیده به صفحه جاذب برای گرم کردن آب و اجزاء دیگر آب شیرین استفاده می‌شود تمام انرژی تابشی رسیده به صفحه جاذب قابل ذخیره‌سازی در پارافین نیست. در اینجا فرض شده است حدود 35 درصد انرژی تابشی خورشید در پارافین ذخیره شود. علاوه براین فرض می‌شود بازده متوسط آب‌شیرین‌کن 55 درصد باشد یعنی به‌طور متوسط این مقدار از تابش خارج از آب‌شیرین‌کن(رسیده به پشت شیشه) توسط صفحه جاذب جذب شود. با توجه به اینکه متوسط سالیانه انرژی تابشی خورشید در یک روز برای شهر کرمان $21\ MJ/m^2$(صفاری پور و همکاران [20]) می‌باشد و با توجه به مساحت صفحه جاذب و فرضیات بالا، میزان انرژی که باید در پارافین ذخیره شود حدوداً برابر 2/1 MJ خواهد بود. با توجه به گرمای نهان پارافین، جرم پارافین مورد نیاز برابر 9/1 کیلوگرم خواهد بود.



شکل 1 شماتیک آب شیرین کن بهبودیافته و محل قرار گیری محفظه های ماده تغییرفازدهنده



الف



ب

شکل 2 عکس مجموعه صفحه جاذب به همراه محل قرار گیری محفظه های ذخیره ماده تغییر فاز دهنده پیش از بسته شدن درب محفظه ها، الف) نمای کنار(محفظه ها هنوز با ماده تغییرفازدهنده پر نشده اند)، ب) نمای بالا (محفظه ها با ماده تغییر فاز دهنده پر شده است)

2-2- آزمایش‌های انجام‌شده

ساخت، نصب و آزمایش آب‌شیرین‌کن‌ها در کرمان و دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب 57/24 و 30/05 انجام شده است. به‌منظور بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار بهبودیافته با و بدون ماده تغییرفازدهنده، این دستگاه‌ها به‌صورت تجربی و در هوای آزاد مورد آزمایش قرار گرفتند. آب‌شیرین‌کن‌ها در راستای جنوب نصب شدند و با توجه به اینکه شیب بهینه برای دریافت بیشترین انرژی تابشی سالانه برابر با عرض جغرافیایی می‌باشد [21]، آب‌شیرین‌کن‌ها به‌صورت ثابت در شیب 30 درجه نصب‌شده‌اند. هر کدام از آزمایش‌ها برای دو روز متوالی انجام‌شده است. هر آزمایش از حدود ساعت 7 صبح شروع‌شده است و به مدت 24 ساعت (تا حدود ساعت 7 صبح روز بعد) ادامه داشته است. آزمایشات در روزهای 1 تا 8 ژوئن میلادی مطابق 11 تا 18 خردادماه انجام‌شده‌اند. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر اثر پارامترهای مختلف و اطمینان از صحت آزمایشات هرکدام از آزمایشات در دو روز متوالی انجام‌شده است سپس روزهای مشابه از نظر میزان تابش و دمای محیط برای مقایسه عملکرد دستگاه در شرایط مختلف موردبررسی قرارگرفته‌اند. بعد از انجام آزمایشات و مقایسه شرایط آب و هوایی روزهای 2، 3، 5 و 7 ژوئن مطابق با 12، 13، 15 و 17 خرداد برای تحلیل و بررسی نتایج انتخاب شدند.

یکی از متغیرهای مهم در عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی میزان تابش خورشید است. برای اندازه‌گیری میزان تابش از پیرانومتر (تابش‌سنج) کیپ‌اندزونن (Kipp & Zonen) مدل CMP3 که موازی پوشش شیشه‌ای نصب‌شده، استفاده‌شده است (شکل 3). برای اندازه‌گیری میزان آب شیرین تولیدشده از استوانه مدرج پلاستیکی 500 میلی‌متری استفاده‌شده است. میزان آب شیرین تولیدشده توسط دستگاه‌ها در طول روز هر یک ساعت یک‌بار و بعد از غروب در ابتدای روز بعد (تولید شبانه) اندازه‌گیری شده است.

جدول 1 مشخصات و خواص ترموفیزیکی موم پارافین مورد استفاده در این تحقیق

ویژگی	واحد	مقدار
چگالی جامد	gcm^{-3}	0/84- 0/82
ویسکوزیته	cSt	3/8- 4/2
نقطه اشتعال	^0C	190-210
محتوی روغن	%	ماکزیمم 1/5
نقطه ذوب	^0C	60-62

نقطه انجماد	^0C	57-60

شکل 3 عکس پیرانومتر کیپ -اند-زونن مدل CMP3 نصب شده بر روی دستگاه

دمای آب و دمای صفحه جاذب در حوضچه میانی و در وسط آن و دمای پوشش شیشه‌ای (T_g) در وسط شیشه و در سمت بیرونی شیشه اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری دمای محیط و دمای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن از ترموکوپل‌های نوع K استفاده‌شده است. این دماها با نصب ترموکوپل در محله‌ای موردنظر به‌صورت خودکار هر 10 دقیق یک‌بار توسط دیتالاگر یونیورسال هیوکی مدل 8401 ثبت‌شده است.

یکی دیگر از متغیرهایی که بر عملکرد آب‌شیرین‌کن تأثیر دارد دبی جرمی آب‌شور ورودی به آب‌شیرین‌کن‌ها، $\dot{m}_b$، می‌باشد. به دین منظور در این تحقیق به بررسی تأثیر دبی آب‌شور بر عملکرد آب‌شیرین‌کن پرداخته می‌شود. به دلیل اینکه چگالی آب حدوداً 1 کیلوگرم بر لیتر است از نظر مقدار وقتی دبی جرمی برحسب گرم بر دقیقه بیان شود با دبی حجمی یک میلی‌لیتر بر دقیقه برابر خواهد بود. میزان دبی حجمی آب‌شور ورودی به آب‌شیرین‌کن با استفاده از یک حجم معیار و اندازه‌گیری زمانی که برای پر شدن آن صرف می‌شود اندازه‌گیری شده و برحسب میلی‌لیتر بر دقیقه، mL/min، یا همان معادل آن گرم بر دقیقه بیان می‌شود. دبی حجمی آب‌شور ورودی در روزهای 2، 3، 5 و 7 خردادماه به ترتیب برابر 50، 80، 130 و 50 میلی‌لیتر بر دقیقه می‌باشد.

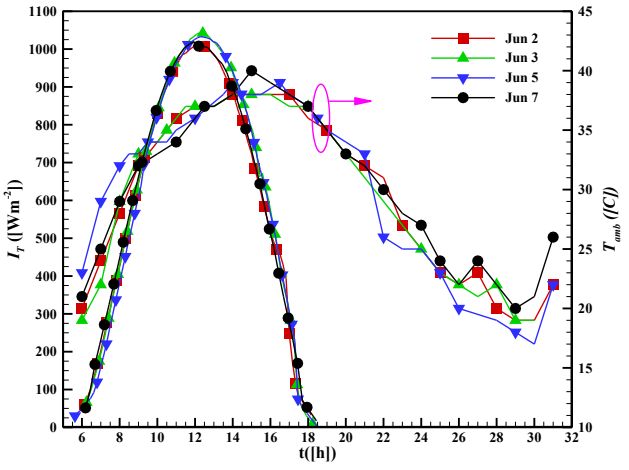
عملکرد گرمایی سامانه‌های مختلف با استفاده از میزان بازدهی انرژی آن‌ها موردسنجش قرار می‌گیرد. بازده نشان‌دهنده توانایی این سامانه‌ها را در بهره‌مندی از انرژی ورودی نشان دهد. در حالت کلی، بازده نشان‌دهنده کسری از انرژی ورودی است که تبدیل به انرژی خروجی مفید شده است. ازآنجاکه در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی هدف تولید آب شیرین است بازده به‌صورت نسبت انرژی صرف شده برای تبخیر آب شیرین تولیدی به کل انرژی تابشی رسیده به آب‌شیرین‌کن تعریف می‌شود. در قالب معادله، بازده آب‌شیرین‌کن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta(\%) = \frac{m_F^D h_{fg}}{E_S^D} \times 100 = \frac{V_F^D \rho h_{fg}}{E_S^D} \times 100 \qquad (1)$$

که m_F^D و V_F^D به ترتیب جرم و حجم آب شیرین تولیدی کل (شبانه‌روز)، h_{fg} آنتالپی نهان تبخیر آب، $\rho \approx 1\ ^{kg}/_{L}$ چگالی آب و E_S^D کل انرژی خورشیدی در دسترس آب‌شیرین‌کن (یعنی کل انرژی‌ای که در طول روز به سطح بیرونی شیشه برخورد می‌نماید)، می‌باشند. جزییات بیشتر در مورد نحوه محاسبه بازده در [17, 18] آمده است. در قسمت نتایج علاوه بر متغیرهای تعریف‌شده بالا، از V_F^{cum} و V_F که به ترتیب نشان‌دهنده میزان آب شیرین تجمیعی و لحظه‌ای می‌باشند نیز استفاده خواهد شد.

3- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار بهبودیافته با و بدون ماده تغییرفازدهنده ارائه‌شده است. بدین منظور دو مجموعه آزمایش بر روی آب‌شیرین‌کن‌ها انجام‌گرفته است. در این مجموعه آزمایشات اثر دبی جرمی آب‌شور ورودی و ضخامت پوشش شیشه‌ای بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها موردبررسی قرار می‌گیرد. آزمایشات در روزهای 2، 3 و 5 ژوئن برای بررسی تأثیر دبی آب‌شور ورودی و در روزهای 2 و 7 برای بررسی اثر ضخامت پوشش شیشه‌ای انجام‌شده‌اند. بررسی تأثیر ضخامت شیشه بر عملکرد آب‌شیرین‌کن در روزهای 2 و 7 خردادماه و با دو شیشه با ضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متر و با دبی آب‌شور 50 میلی‌لیتر بر دقیقه انجام‌شده است. لازم به ذکر است علاوه بر ضخامت، جنس پوشش، رنگ آن، و میزان گردوغبار روی پوشش بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارند که در اینجا اثرات آن‌ها بررسی نشده است. آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر دبی آب‌شور ورودی به آب‌شیرین‌کن به ترتیب در روزهای 2، 3و 5 ژوئن و با دبی 50، 80 و 130 میلی‌متر بر دقیقه و ضخامت شیشه 4 میلی‌لیتر انجام‌شده است. تغییرات شدت تابش خورشید و دمای محیط در روزهای آزمایش در شکل 4 نشان داده‌شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود شدت تابش در این روزهای تقریباً برابر است و با توجه به نحوه تغییرات شدت تابش می‌توان فهمید که در روزهای آزمایش آسمان تقریباً صاف بوده است. بررسی نمودار دما در این شکل نشان می‌دهد که در روزهای آزمایش دمای محیط روند یکسانی دارند و در بعضی از زمان‌ها حتی مقادیر تقریباً یکسانی دارند. همچنین نحوه تغییرات دما و تابش خورشید در این شکل نشان می‌دهد که شدت تابش در حدود ظهر خورشیدی (حدود ساعت 12 ظهر) به بیشینه خود می‌رسد درحالی‌که دمای محیط با حدود 3 ساعت تأخیر در حدود ساعت 15 به بیشینه خود می‌رسد. دلیل این تأخیر زمانی را می‌توان با ظرفیت حرارتی هوای محیط و زمین، چگالی هوا، کیفیت هوا و رطوبت موجود در آن توجیه نمود.



شکل 4 تغییرات شدت تابش و دمای محیط در روزهای آزمایش

3-1- بررسی تأثیر دبی آب‌شور ورودی

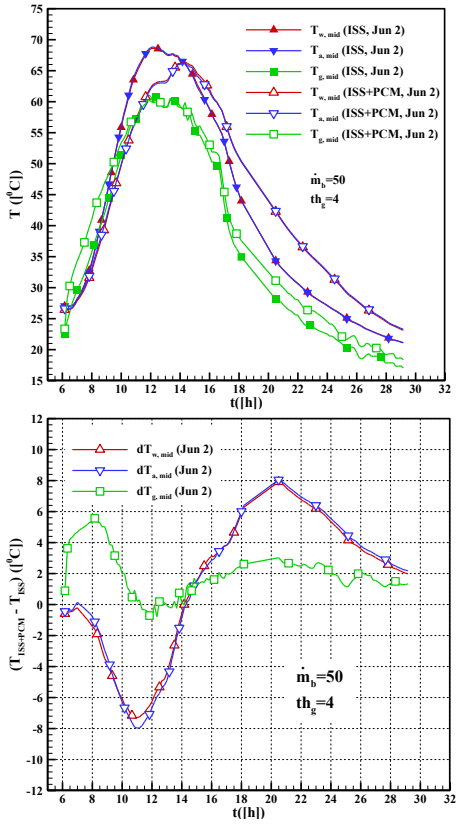
تغییرات دمای صفحه جاذب و آب‌شور در حوضچه میانی و تغییرات دمای وسط پوشش شیشه‌ای در دو دستگاه آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده (در

شکل‌ها ISS) و با ماده تغییرفازدهنده (ISS+PCM) و اختلاف بین دماهای متناظر بین دو دستگاه در روزهای آزمایش در شکل 5، شکل 6 و شکل 7 نشان داده‌شده است. در حالت کلی دماهای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده از شروع آزمایش روند افزایشی دارند تا اینکه در ساعت حدود 12/5 عصر(حدود ظهر خورشیدی) به مقدار ماکزیمم خود می‌رسند و بعد از آن تا انتهای آزمایش کاهش می‌یابند که این روند تطابق مستقیمی با روند تغییرات ساعتی تابش خورشید دارد. این تغییرات برای آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده، به علت وجود انرژی حرارتی ذخیره‌شده در پارافین کمی پیچیده‌تر بوده و علاوه بر تابش خورشید به دمای محیط و دبی آب‌شور نیز وابسته می‌باشد به‌طوری‌که دمای آب و صفحه جاذب تا حدود ساعت 15 افزایش می‌یابند. بعد از آن، این دماها البته با شیب ملایم‌تری از نرخ تغییرات مربوط به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده روند کاهشی پیدا می‌کنند.

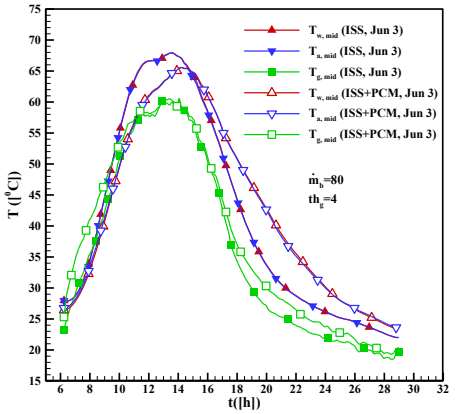
علاوه بر این همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تا حدود ساعت 15 دمای صفحه جاذب و آب‌شور برای آب‌شیرین‌کن بدون پارافین فازدهنده همواره بزرگ‌تر از دمای آب‌شیرین‌کن با پارافین می‌باشد که دلیل آن این است که به علت وجود پارافین و ظرفیت حرارتی آن تغییرات دما تا پیش از دمای ذوب پارافین (62 درجه سلسیوس) در این آب‌شیرین‌کن با لختی بیشتری همراه بوده و با شیب کمتری انجام می‌شود. همچنین بعد از رسیدن به دمای ذوب با توجه به ثابت بودن دمای پارافین در زمان تغییر فاز، تغییرات دما در صفحه جاذب و آب بسیار کند خواهد بود. لازم به ذکر است با توجه مقاومت حرارتی بین صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده، تغییرات دمای صفحه جاذب و به طبع آن آب‌شور بعد از رسیدن به دمای ذوب خصوصاً در دبی‌های جرمی بالا (80 و 130 میلی‌لیتر بر دقیقه) کاملاً ثابت نمی‌شود و تغییرات کمی دارد هرچند این تغییرات کمتر از تغییرات دمایی آب‌شیرین‌کن بدون پارافین است. علاوه براین همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش دبی تلفات حرارتی هم افزایش‌یافته و بیشینه دما در هر دو آب‌شیرین‌کن با و بدون پارافین کاهش می‌یابد خصوصاً برای دبی 130 میلی‌لیتر بر دقیقه این مسئله به‌طور واضحی قابل‌مشاهده است. وجود این تلفات حرارتی باعث شده است در دبی 130 میلی‌لیتر بر دقیقه دمای صفحه جاذب بیشتر از دمای ذوب نشود.

نکته دیگری که در این شکل‌ها وجود دارد این است که دمای شیشه در آب‌شیرین‌کن با پارافین همواره به جزء گاهی در محدوده ساعت 12 تا 16 عصر از دمای شیشه دستگاه آب‌شیرین‌کن بدون پارافین بیشتر است. دمای پوشش شیشه متأثر از چند عامل شامل جنس شیشه، میزان تابش خورشیدی جذب‌شده در شیشه، دمای محیط، انتقال حرارت تابشی بین صفحه جاذب و شیشه، انتقال حرارت جابجایی و تبخیری بین هوا و شیشه و انتقال حرارت جابجایی و تابشی بین شیشه و محیط اطراف می‌باشد. در ساعات اولیه صبح همه عوامل فوق به جزء نرخ انتقال حرارت جابجایی (همرفتی) و تبخیری بین صفحه جاذب و شیشه برای هر دو آب‌شیرین‌کن تقریباً یکسان هستند. بیشتر بودن دمای شیشه دستگاه با ماده تغییرفازدهنده نسبت به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده را می‌توان به نرخ بیشتر گردش هوا در این آب‌شیرین‌کن نسبت به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده دانست. به دلیل بالاتر بودن دمای صفحه جاذب و آب در آب شیرین بدون ماده تغییرفازدهنده نسبت به آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده، هوای بالای صفحه جاذب در این آب‌شیرین‌کن زودتر گرم شده و نرخ گردش بیشتری نسبت به آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده خواهد داشت.

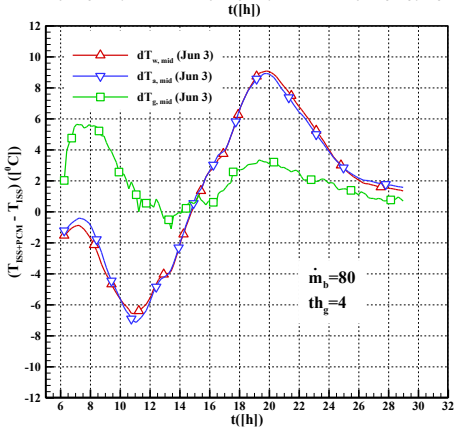
همچنین با توجه به اینکه در ساعات اولیه روز تابش به‌صورت مایل از شیشه عبور می‌نماید نسبت به ظهر خورشیدی کسر بیشتری از انرژی تابشی خورشید جذب شیشه‌ها خواهد شد. لذا با توجه به مجموعه این نکات، گردش بیشتر هوا در آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده باعث خواهد شد که انتقال حرارت جابجایی بین هوا و شیشه افزایش‌یافته و با توجه به کمتر بودن دمای هوا نسبت به پوشش شیشه‌ای در این ساعات، دمای شیشه در این آب‌شیرین‌کن نسبت به آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده کمتر باشد. با گذشت زمان و گرم شدن هوای درون محفظه اختلاف بین دمای شیشه دو آب‌شیرین‌کن در حدود ساعت 8 صبح روند کاهشی به خود می‌گیرد و از حدود ساعت 12تا حدود ساعت 16 اختلاف قابل‌توجهی بین این دو دما مشاهده نمی‌شود. بعد از ساعت 16 با توجه به وجود پارافین مایع در درون آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده، که به‌عنوان منبع انرژی عمل می‌نماید، دمای هوای درون محفظه در این آب‌شیرین‌کن نسبت به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده بیشتر بوده و باعث می‌شود دمای هوا و در نتیجه دمای شیشه در این آب‌شیرین‌کن بالاتر باشد. شکل‌های ارائه‌شده نشان می‌دهند که در آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده دمای پوشش شیشه‌ای در ساعات اولیه روز حتی بیشتر از دمای صفحه جاذب می‌باشد که دلیل آن جذب تابش عبوری توسط شیشه، تلفات حرارتی کم و پایین بودن ظرفیت حرارتی شیشه می باشد.



شکل 5 عکس مقایسه الف) تغییرات دمای آب‌شور، صفحه جاذب و شیشه و ب) اختلاف بین دمای قسمت های مختلف آب شیرین کن ها در روز 2 ژوئن

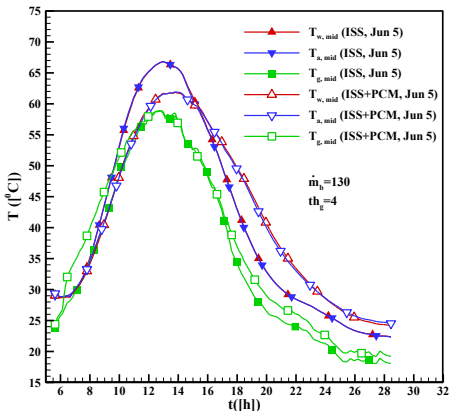


الف

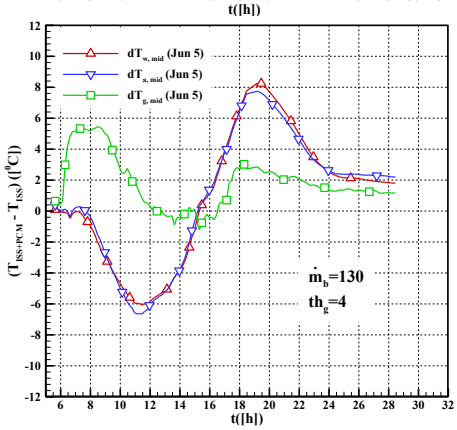


ب

شکل 6 مقایسه الف) تغییرات دمای آب‌شور، صفحه جاذب و شیشه و ب) اختلاف بین دمای قسمت های مختلف آب شیرین کن ها در روز 3 ژوئن



الف



ب

شکل 7 عکس مقایسه الف) تغییرات دمای آب‌شور، صفحه جاذب و شیشه و ب) اختلاف بین دمای قسمت های مختلف آب شیرین کن ها در روز 5 ژوئن

بررسی شکل 5، شکل 6 و شکل 7 نشان می‌دهند که هر چند در طول روز دمای صفحه جاذب در دستگاه بدون ماده تغییرفازدهنده می‌تواند تا حدود 8 درجه بیشتر از دستگاه با ماده تغییرفازدهنده باشد اما در طول شب این وضعیت برعکس شده و دمای صفحه جاذب در دستگاه با ماده تغییرفازدهنده تا 10 درجه هم می‌تواند بیشتر از دستگاه بدون ماده تغییرفازدهنده باشد. نکته دیگر اینکه با افزایش دبی حجمی آب‌شور ورودی، میزان اختلاف دما کاهش پیدا می‌نماید که به دلیل اتلافات حرارتی و کاهش ذخیره انرژی حرارتی در پارافین می‌باشد. توزیع تجمعی آب شیرین تولیدی و نرخ ساعتی تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده و بدون آن در شکل 8 مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طول روز آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده هم نرخ ساعتی تولید آب شیرین بیشتری دارد و هم میزان تجمعی آب شیرین بیشتری دارد اما در طول شب شرایط برعکس شده و آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده عملکرد بهتری دارد. عملکرد بهتر آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده در طول شب باعث شده است که در همه آزمایش‌ها در انتهای 24 ساعت آزمایش آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده میزان آب شیرین بیشتری تولید کرده باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود با افزایش دبی آب‌شور ورودی خصوصاً برای افزایش از 80 به 130 میلی‌لیتر بر دقیقه، میزان آب شیرین تولیدی کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش تلفات حرارتی به دلیل افزایش خروج انرژی حرارتی با آب‌شور گرم شده می‌باشد. در جدول 2 مقایسه‌ای بین عملکرد شبانه‌روزی (24 ساعته) آب‌شیرین‌کن‌های بهبودیافته با و بدون ماده تغییرفازدهنده ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آب‌شیرین‌کن بهبودیافته با ماده تغییرفازدهنده در همه آزمایش‌ها عملکرد نسبتاً بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده داشته است و بازده آن بسته به دبی‌های مختلف بین 6/9 تا 12 درصد نسبت به آب‌شیرین‌کن بهبودیافته بدون ماده تغییرفازدهنده بهتر بوده است. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش دبی آب‌شور ورودی، بازده آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده از 40/2 درصد به 29/0 درصد کاهش یافته است. نکته دیگری که در این جدول دیده می‌شود این است که با افزایش دبی جرمی آب‌شور ورودی بازده هر دو آب‌شیرین‌کن کاهش می‌یابد. بااین‌وجود افزایش دبی جرمی از 50 به 80 میلی‌متر باعث کاهش بیشتر عملکرد آب‌شیرین‌کن با پارافین می‌شود ولی افزایش بیشتر دبی جرمی(از 80 به 130 میلی‌لیتر بر دقیقه) باعث کاهش کمتری در عملکرد آب‌شیرین‌کن با پارافین می‌شود.

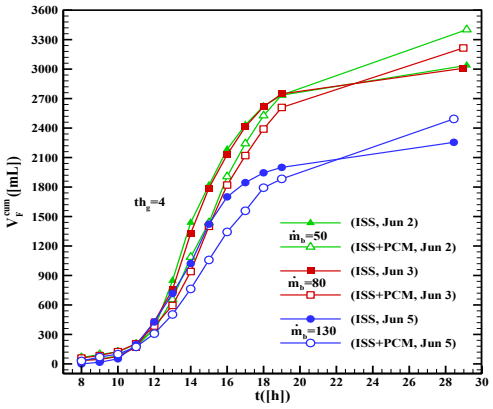
جدول 2 مقایسه عملکرد دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن در روزهای آزمایش

روز	$\dot{m}_b$ $(\frac{mL}{min})$	th_g (mm)	E_S^D (MJ)	دستگاه	$V_F^D(mL)$	η (%)	ϕ(%)
2 ژوئن	50	4	20/8	ISS	3038	35/9	12/0
				ISS+PCM	3402	40/2	
3 ژوئن	80	4	21/4	ISS	3008	34/5	6/9
				ISS+PCM	3215	36/9	
5 ژوئن	130	4	21/1	ISS	2255	26/2	10/6
				ISS+PCM	2493	29/0	

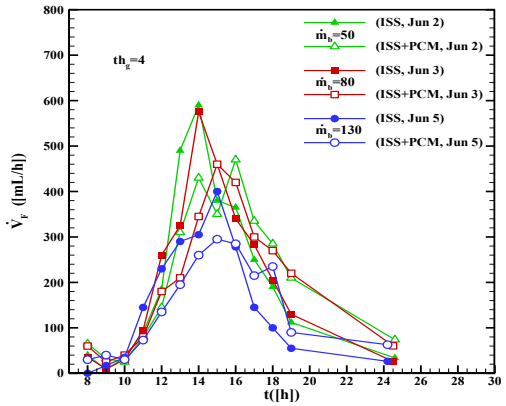
7 ژوئن	50	6	21/1	ISS	2707	31/4	3/7
				ISS+PCM	2806	32/6	

3-2- بررسی تأثیر ضخامت شیشه

در این قسمت، اثر ضخامت‌های مختلف پوشش شیشه‌ای بر عملکرد دو آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته با و بدون ماده تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها با شیشه‌هایی به ضخامت 4 و 6 میلی‌متر و با دبی 50 میلی‌لیتر انجام‌شده است. آزمایش مربوط به ضخامت 4 میلی‌متر همان آزمایش قبلی برای بررسی دبی می‌باشند که در روز 2 ژوئن انجام‌شده است. آزمایش مربوط به ضخامت 6 میلی‌متر در روز 7 ژوئن انجام‌شده است. در شکل 9 دمای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن در ضخامت 6 میلی‌متر برای دو آب‌شیرین‌کن نشان داده‌شده است و در شکل 10 دمای قسمت‌های مختلف دو آب‌شیرین‌کن در دو ضخامت مختلف باهم مقایسه شده است. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود برای هر دو آب‌شیرین‌کن با افزایش ضخامت پوشش شیشه‌ای، دمای صفحه جاذب و دمای آب‌شور و به‌صورت جزئی دمای پوشش شیشه‌ای در محدوده ساعت 10 صبح تا 16 بعدازظهر کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار این است که با افزایش پوشش شیشه‌ای ضریب انعکاس و ضریب جذب پوشش شیشه‌ای افزایش‌یافته و میزان عبور انرژی تابشی از آن کاهش می‌یابد. در جدول 2 میزان آب شیرین تولیدی و بازده آب‌شیرین‌کن‌ها در دو ضخامت پوشش شیشه‌ای نشان و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش ضخامت پوشش شیشه‌ای باعث کاهش آب شیرین تولیدی و کاهش بازده هر دو آب‌شیرین‌کن خورشیدی می‌شود اما این کاهش برای هر دو آب‌شیرین‌کن یکسان نیست و آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده کاهش بیشتری را تجربه کرده است به‌نحوی‌که در ضخامت 6 میلی‌متر، این آب‌شیرین‌کن فقط حدود 3/7 درصد بیشتر از آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده تولید آب شیرین داشته است. دلیل کاهش بیشتر عملکرد آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده را می‌توان به این صورت توجیه کرد که با افزایش ضخامت پوشش شیشه‌ای میزان انرژی رسیده به صفحه جاذب کاهش‌یافته و انرژی ذخیره‌شده در ماده تغییرفازدهنده کاهش می‌یابد و مزیت وبرتری این دستگاه در استفاده از ماده تغییرفازدهنده نیز کاهش می‌یابد.



الف



ب

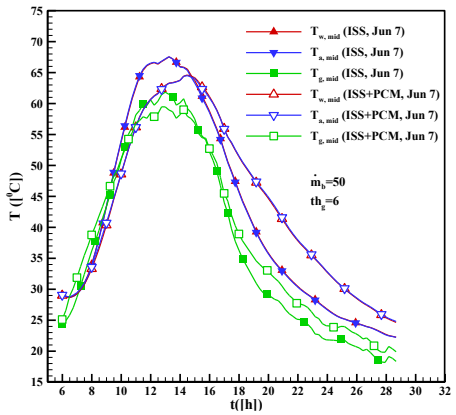
شکل 8 مقایسه الف) توزیع تجمعی تولید آب شیرین و ب) نرخ ساعتی تولید آب شیرین در دو آب شیرین کن در دبی های مختلف آب شور ورودی

3-3- مقایسه با مطالعات مشابه

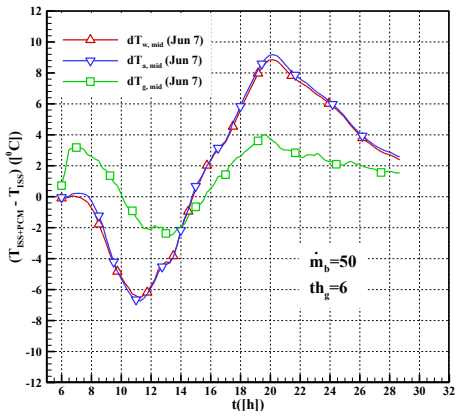
در جدول 3 مقایسه‌ای بین آب‌شیرین‌کن حاضر و چند مطالعات مشابه انجام‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر PCM بر آب‌شیرین‌کن‌ها متنوع بوده و بسته به نوع آب‌شیرین‌کن، نوع PCM و شرایط آزمایش، میزان آب شیرین تولیدی بین 12 تا حدود 98 درصد افزایش یابد. در مطالعه حاضر استفاده از PCM افزایش 12 درصدی را به همراه داشته که مشابه مطالعه شلابی و همکاران [13] است.

4- نتیجه‌گیری

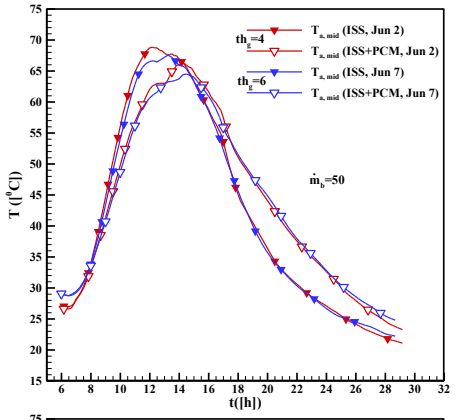
در این تحقیق اثر ماده تغییرفازدهنده بر عملکرد یک آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای شیب‌دار بهبودیافته به‌صورت تجربی موردمطالعه قرارگرفته است. به‌منظور ارزیابی میزان بهبود عملکرد با اضافه کردن ماده تغییرفازدهنده، مقایسه‌ای بین نتایج آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته با ماده تغییرفازدهنده پارافین و آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته بدون ماده تغییرفازدهنده انجام‌شده است. دو دستگاه در شرایط بیرونی و در شهر کرمان به‌صورت هم‌زمان و در بازه‌های زمانی 24 ساعته (یک شبانه‌روز) مورد ارزیابی قرار گرفتند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، عملکرد دو آب‌شیرین‌کن در سه دبی آب‌شور ورودی و دو ضخامت پوشش شیشه‌ای انجام‌شده است. از این ارزیابی‌ها نتایج زیر به دست آمد:



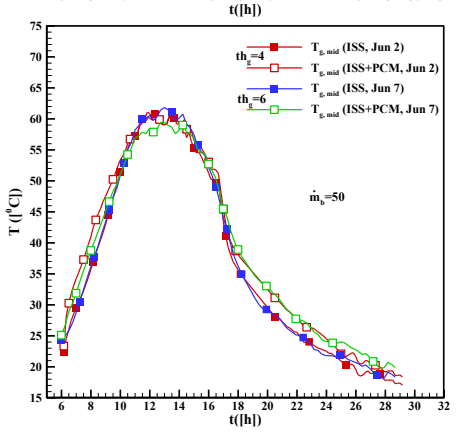
الف



ب



الف



ب

شکل 10 بررسی تأثیر ضخامت شیشه بر الف) دمای صفحه جاذب، و ب) دمای پوشش شیشه ای آب شیرین کن ها

1- استفاده از ماده تغییرفازدهنده باعث کاهش دمای بیشینه صفحه جاذب و آب‌شور داخل حوضچه در طول روز می‌شود.

2- بهبود در عملکرد آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده وابسته به شرایط کاری و طراحی دارد و اضافه شدن پارافین به آب‌شیرین‌کن ، آب شیرین تولیدی آن را بین 3/7 تا 12/0 درصد افزایش می‌دهد.

3- افزایش دبی آب‌شور ورودی و افزایش ضخامت پوشش شیشه‌ای باعث کاهش بازده و آب شیرین تولیدی هر دو آب‌شیرین‌کن می‌شود.

4- آب‌شیرین‌کن بهبودیافته با ماده تغییرفازدهنده در همه آزمایش‌ها عملکرد بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده داشته و بازده آن بسته به شرایط کاری و طراحی مختلف بین 3/7 تا 12 درصد نسبت به آب‌شیرین‌کن بهبودیافته بدون ماده تغییرفازدهنده بهتر است.

5- با افزایش دبی آب‌شور ورودی، بازده آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده از 40/2 درصد به 29/0 درصد کاهش‌یافته است.

6- استفاده از ماده تغییرفازدهنده پارافین باعث کاهش آب شیرین تولیدی در طول روز شده است ولی آب شیرین تولیدی در طول شب را به‌صورت قابل‌توجهی افزایش داده است.

7- در مقایسه با آب‌شیرین‌کن بدون ماده تغییرفازدهنده، افزایش ضخامت پوشش شیشه‌ای کاهش بیشتری در عملکرد آب‌شیرین‌کن با ماده تغییرفازدهنده ایجاد می‌نماید.

جدول 3 تأثیر ماده تغییرفازدهنده بر عملکرد چند آب‌شیرین‌کن‌ها حوضچه‌ای

مرجع	نوع آب‌شیرین‌کن	نوع PCM	درصد تغییر
[13]	شیب‌دار	پارافین	٪ 12
[22]	استاندارد	دو نوع پارافین	٪ 20
[23]	شیب‌دار	پارافین	٪ 31
[24]	شیب‌دار	پارافین+ نانو ذرات + میدان مغناطیسی	٪ 98
مطالعه حاضر	شیب‌دار	پارافین	٪ 12

4- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره 02/3699 با استفاده از اعتبارات پژوهشی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان ایران انجام شده است.

6- مراجع

[1] M. Dashtban and F. F. Tabrizi, Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage, *Desalination,* Vol. 279, No. 1-3, pp. 415-422, 2011.

[2] A. Kabeel and M. Abdelgaied, Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions, *Desalination,* Vol. 383, pp. 22-28, 2016.

[3] M. Al-harahsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, Z. Alzghoul, Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 128, pp. 1030-1040, 2018.

[4] M. R. Safaei, H. R. Goshayeshi, I. Chaer, Solar still efficiency enhancement by using graphene oxide/paraffin nano-PCM, *Energies,* Vol. 12, No. 10, pp. 2002, 2019.

[5] A. Amarloo and M. B. Shafii, Enhanced solar still condensation by using a radiative cooling system and phase change material, *Desalination,* Vol. 467, pp. 43-50, 2019.

[6] G. Rajasekhar and M. Eswaramoorthy, Performance evaluation on solar still integrated with nano-composite phase change materials, *Applied Solar Energy,* Vol. 51, No. 1, pp. 15-21, 2015.

[7] A. A. M. Omara, A. A. A. Abuelnuor, H. A. Mohammed, M. Khiadani, Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: a review, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* Vol. 139, No. 3, pp. 1585-1617, 2020/02/01, 2020.

[8] F. F. Tabrizi, M. Dashtban, H. Moghaddam, Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system, *Desalination,* Vol. 260, No. 1-3, pp. 248-253, 2010.

[9] S. S. Adibi Toosi, H. R. Goshayeshi, I. Zahmatkesh, V. Nejati, Experimental assessment of stepped solar still with hybrid NPCM

under magnetic field, *Mechanical Engineering of Tabriz University,* Vol. 53, No. 1, pp. 13-22, 2023.
[10] V. P. Katekar and S. S. Deshmukh, A review of the use of phase change materials on performance of solar stills, *Journal of Energy Storage,* Vol. 30, pp. 101398, 2020.
[11] C. Yadav and M. Kumar, Recent advances in stepped and weir type solar still, *Int. J. Recent Adv. Eng. Technol,* Vol. 4, No. 1, pp. 83-90, 2016.
[12] M. R. Assari, H. Basirat Tabrizi, A. Kavoosinejad, S. Rahimi, Investigation of phase change materials on the performance of solar desalination plants, *Mechanical Engineering Journal,* Vol. 28, No. 1, pp. 42-48, 2019.
[13] S. M. Shalaby, E. El-Bialy, A. A. El-Sebaii, An experimental investigation of a v-corrugated absorber single-basin solar still using PCM, *Desalination,* Vol. 398, pp. 247-255, 2016.
[14] E. A. Abdel-Aziz, T. M. Mansour, M. M. K. Dawood, T. M. Ismail, K. Ramzy, Exergoeconomic and enviroeconomic evaluations of conventional solar still using PCM and electric heater powered by solar energy: an experimental study, *Environmental Science and Pollution Research,* Vol. 30, No. 24, pp. 66135-66156, 2023.
[15] U. F. Alqsair, Enhancement the production of trays solar still via nano phase change material and preheating feed-water, *Case Studies in Thermal Engineering,* Vol. 53, pp. 103822, 2024.
[16] R. Sathyamurthy, Silver (Ag) based nanoparticles in paraffin wax as thermal energy storage for stepped solar still – An experimental approach, *Solar Energy,* Vol. 262, pp. 111808, 2023.
[17] H. Amiri, Design, fabrication, and experimental analysis of improved stepped solar still, *Mechanical Engineering of Tabriz University,* Vol. 52, No. 3, pp. 237-246, 2022 (In Persian).
[18] H. Amiri, Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser, *Solar Energy,* Vol. 248, pp. 88-102, 2022.
[19] T. Kousksou, A. Jamil, T. E. Rhafiki, Y. Zeraouli, Paraffin wax mixtures as phase change materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells,* Vol. 94, No. 12, pp. 2158-2165, 2010.
[20] M. Safaripour and M. Mehrabian, Predicting the direct, diffuse, and global solar radiation on a horizontal surface and comparing with real data, *Heat and mass transfer,* Vol. 47, No. 12, pp. 1537-1551, 2011.
[21] S. Jafari and E. J. Javaran, An optimum slope angle for solar collector systems in kerman using a new model for diffuse solar radiation, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* Vol. 34, No. 9, pp. 799-809, 2012.
[22] V. S. Vigneswaran, G. Kumaresan, B. V. Dinakar, K. K. Kamal, R. Velraj, Augmenting the productivity of solar still using multiple PCMs as heat energy storage, *Journal of Energy Storage,* Vol. 26, pp. 101019, 2019.
[23] R. Grewal and M. Kumar, Performance evaluation of a concatenated stepped solar still system loaded with different masses of energy storage material, *Energy,* Vol. 259, pp. 125005, 2022.
[24] S. S. Adibi Toosi, H. R. Goshayeshi, I. Zahmatkesh, V. Nejati, Experimental assessment of new designed stepped solar still with Fe3O4 + graphene oxide + paraffin as nanofluid under constant magnetic field, *Journal of Energy Storage,* Vol. 62, pp. 106795, 2023.