



Modeling and Thermal Analysis of the Performance of the Improved Stepped Solar Still Equipped with a Fan and Phase Change Material (PCM)

Hossein Amiri^{1*}

1. Assistant Professor, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. Email: hosseinamiri2010@gmail.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article type: Research Paper</p> <p>Article History: Received 1 June 2025 Revised 9 July 2025 Accepted 11 September 2025 Published Online 23 September 2025</p> <p>Keywords: One-dimensional thermal model, Improved solar still, Fan, Phase change material (PCM), Parametric study, Solar energy.</p>	<p>This study presents the development of a one-dimensional thermal model to analyze the performance of an improved inclined solar still equipped with a fan and phase change material (PCM). The modeling is based on mass and energy conservation equations applied to the various components of the system, incorporating all heat transfer mechanisms as well as the processes of evaporation and condensation. The proposed model is capable of estimating the temperatures of different parts of the solar still, as well as the hourly and daily fresh water production rates. Numerical simulation of the model was carried out in MATLAB using a time step of 0.1 seconds. In this research, the model was validated over a period of three days. The results demonstrate high accuracy of the thermal model, showing that it can reliably predict the component temperatures and freshwater yield under varying conditions. The model exhibited excellent precision in estimating the temperatures of the brine and absorber plate, with root mean square error (RMSE) values below 2.2 °C. For freshwater production, the maximum deviation between the model predictions and experimental data was less than 9% in the worst case. Parametric studies revealed that selecting an appropriate melting temperature for the PCM can enhance freshwater production by up to 5%, while the PCM mass had no significant effect on the still's performance.</p>
<p>Cite this article:</p>	<p>Amiri, H. (2025). Modeling and Thermal Analysis of the Performance of the Improved Stepped Solar Still Equipped with a Fan and Phase Change Material (PCM). <i>Energy Systems: Technology and Management</i>, 1 (1), 8-25. DOI: http://doi.org/10.48306/estm.2025.231015</p>



© Graduate University of Advanced Technology.
DOI: <http://doi.org/10.48306/estm.2025.231015>

* Corresponding author.
Email: hosseinamiri2010@gmail.com



مدل‌سازی و تحلیل حرارتی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته مجهز به فن و ماده تغییر فاز (PCM)

حسین امیری^{۱*}

۱. استادیار، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. رایانامه: hosseinamiri2010@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	این مطالعه به توسعه یک مدل حرارتی یک‌بعدی برای تحلیل عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته مجهز به فن و ماده تغییر فاز (PCM) پرداخته است. مدل‌سازی بر اساس معادلات بقای جرم و انرژی برای اجزای مختلف سیستم انجام شده و تمامی مکانیزم‌های انتقال حرارت و فرآیندهای تبخیر و تقطیر در آن لحاظ شده‌اند. مدل ارائه شده قادر است دمای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن و همچنین نرخ آب شیرین تولیدی ساعتی و روزانه را برآورد نماید. حل عددی مدل با گام زمانی ۰.۱ ثانیه در MATLAB انجام شد. در این تحقیق، اعتبارسنجی مدل در سه روز انجام شده است. نتایج حاکی از دقت بالای مدل حرارتی است و مدل قادر است دمای اجزای آب‌شیرین‌کن و مقدار آب شیرین تولیدی در روزهای مختلف را با دقت خوبی پیش‌بینی کند. دقت مدل در تخمین دمای آب‌شور و صفحه جاذب دقت مدل بسیار خوب بوده است (ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از ۲.۲ درجه سانتی‌گراد). در تخمین میزان آب شیرین تولیدی، بیشترین اختلاف بین نتایج مدل با داده‌های تجربی در بدترین حالت کمتر از ۹ درصد بوده است. بررسی پارامترهای طراحی نشان داد که انتخاب دمای ذوب مناسب برای PCM می‌تواند تولید آب شیرین را تا ۵ درصد افزایش دهد، اما میزان جرم PCM تأثیر معناداری بر عملکرد آب‌شیرین‌کن نداشت.
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱	
کلیدواژه: مدل حرارتی یک‌بعدی، آب‌شیرین‌کن بهبودیافته، فن، ماده تغییر فاز دهنده، بررسی پارامتری، انرژی خورشیدی.	

استناد: امیری، حسین (۱۴۰۴). مدل‌سازی و تحلیل حرارتی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته مجهز به فن و ماده تغییر فاز (PCM). سیستم‌های انرژی: فناوری و مدیریت، ۱ (۱) ۲۵-۸.
DOI: <http://doi.org/10.48306/estm.2025.231015>

© دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

DOI: <http://doi.org/10.48306/estm.2025.231015>



* نویسنده مسئول.

رایانامه: hosseinamiri2010@gmail.com

۱. مقدمه

آب نقشی حیاتی در بقاء، توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست دارد. با رشد جمعیت، شهرنشینی، آلودگی منابع و تغییرات اقلیمی، بحران جهانی آب شدت یافته و در مناطق خشک مانند ایران بحرانی‌تر شده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که آب در آینده به منبعی راهبردی تبدیل خواهد شد. برای مقابله با کم‌آبی، سه راهکار کلیدی وجود دارد: (۱) مدیریت مصرف و افزایش بهره‌وری، (۲) بازیافت و استفاده مجدد از فاضلاب و (۳) شیرین‌سازی آب‌های شور. اگرچه فناوری‌های شیرین‌سازی امکان بهره‌برداری از منابع گسترده آب شور را فراهم می‌کنند، اما اغلب پرهزینه، انرژی‌بر و وابسته به سوخت‌های فسیلی هستند. ترکیب این فرآیندها با انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، راهکاری پایدار، اقتصادی و دوست‌دار محیط‌زیست برای تأمین آب شرب آینده محسوب می‌شود.

آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب می‌باشند. این آب‌شیرین‌کن‌ها دارای انواع مختلفی می‌باشند که شامل آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای معمولی، شیب‌دار، چندشیب، و چندمرحله‌ای می‌باشند. آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای شیب‌دار خورشیدی نمونه بهبودیافته از آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای معمولی هستند. مطالعات زیادی در مورد آب‌شیرین‌کن‌های شیب‌دار خورشیدی انجام شده است. ولمورگان و سرتار [۱] و کابیل و همکاران [۲، ۳] با بررسی تغییرات ساختاری اعمال شده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، تأثیر این اصلاحات را بر افزایش بازدهی و عملکرد این سامانه‌ها تحلیل کرده‌اند.

عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به تابش خورشید وابسته است و در زمان‌هایی مانند شب یا هوای ابری، عملکرد آن‌ها کاهش و یا متوقف می‌شود. برای جبران این وقفه، می‌توان از سامانه‌های ذخیره‌سازی حرارتی استفاده کرد. ذخیره‌سازی حرارتی می‌تواند از طریق روش‌های مختلفی نظیر گرمای محسوس، گرمای نهان، فرآیندهای ترموشیمیایی یا ترکیبی از آن‌ها صورت گیرد. در این میان، مواد تغییر فازدهنده (PCM) به دلیل ظرفیت بالای ذخیره‌سازی گرمای نهان و پایداری دمایی حین تغییر فاز، گزینه‌ای کارآمد برای تداوم عملکرد سیستم در ساعات بدون تابش هستند [۴]. مطالعات فراوانی در مورد استفاده از مواد تغییر فازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مختلف و میزان تأثیر آن بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها انجام شده است. اله‌راشه و همکاران [۵] نمک‌زدایی از آب‌شور توسط یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای تقویت‌شده با یک گردآورنده خورشیدی خارجی و ماده تغییر فازدهنده را در کشور اردن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با به‌کارگیری مواد ذخیره‌ساز انرژی تولید آب شیرین ۴۷ درصد افزایش می‌یابد و ۴۰ درصد آن بعد از غروب خورشید اتفاق می‌افتد. امارا و همکاران [۶] در یک مقاله مروری به بررسی تأثیر مواد تغییر فازدهنده بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال^۱ و غیرفعال^۲ پرداختند. این بررسی نشان داد که

به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده می‌تواند تولید آب شیرین را در آب‌شیرین‌کن‌های غیرفعال و غیرفعال به ترتیب ۱۲۰ درصد تا ۷۰۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون PCM افزایش دهد.

به‌منظور بررسی میزان تأثیر طراحی‌های مختلف بر میزان تولید آب شیرین، آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی، طوسی و همکاران [۷] چهار حالت مختلف طراحی آب‌شیرین‌کن شامل حالت ساده، حالت همراه با ماده تغییر فازدهنده، حالت همراه با نانو ماده و حالت همراه با نانو ماده تحت میدان مغناطیسی را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که حالت‌های دوم تا چهارم نسبت به حالت اول به ترتیب ۳۷ درصد، ۷۵ درصد و ۹۸ درصد آب شیرین بیشتری تولید کرده است. عساری و همکاران [۸] در پژوهش خود به بررسی جامع مطالعات مرتبط با استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند. نتایج این مرور نشان داد که به‌کارگیری مواد ذخیره‌ساز گرمای نهان، منجر به بهبود قابل توجه عملکرد و افزایش بازدهی آب‌شیرین‌کن‌ها در مقایسه با سامانه‌های مشابه فاقد این مواد می‌شود. شالابی و همکاران [۹] به بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای استاندارد با ماده تغییر فازدهنده موم پارافین پرداختند. نتایج آن‌ها افزایش حدود ۱۲ درصدی در میزان آب شیرین تولیدی را نسبت به نوع مشابه بدون ماده تغییر فازدهنده نشان داد. عبدالعزیز و همکاران [۱۰] به بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای تک‌شیب که یک مخزن پارافین به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده (جهت ذخیره انرژی) در زیر صفحه جاذب آن نصب شده 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 ۱۴ و ۱۷ درصد بهتر بوده است. القصیر [۱۱] مجموعه‌ای از اصلاحات طراحی و عملکردی شامل نصب دو کوئل گرمایش مارپیچ در خارج از محفظه تبخیر، به‌کارگیری فن و همچنین استفاده از مواد تغییر فازدهنده (PCM) جهت ذخیره و آزادسازی حرارت را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فازدهنده به تنهایی باعث ۳۲ درصد بهبود در عملکرد می‌شود.

فن‌ها می‌توانند نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت و جرم از طریق افزایش سرعت جریان هوا ایفا کنند. در سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی، استفاده از فن می‌تواند با تقویت فرآیندهای تبخیر و چگالش، عملکرد آب‌شیرین‌کن را تحت تأثیر قرار دهند. با وجود این پتانسیل، تحقیقات در این زمینه محدود بوده و نیاز به بررسی‌های بیشتر احساس می‌شود. فتح و همکاران [۱۲] یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار با فرآیند رطوبت‌گیری و رطوبت‌زدایی به همراه یک محفظه کندانسور جداگانه که زیر آب‌شیرین‌کن قرار داشت را پیشنهاد و عملکرد آن را به‌طور عددی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از یک فن برای گردش هوا بین محفظه‌های تبخیر و کندانسور استفاده شد. آن‌ها در ادامه تحقیق قبلی خود، سناریویی که در آن هوا به‌طور طبیعی بین محفظه‌های تبخیر و کندانسور جریان می‌یابد را به‌صورت

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 این نکته اولین هدف این تحقیق بررسی اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده پارافین بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن به صورت عددی می‌باشد. یکی دیگر از نکاتی که از مرور منابع به دست آمد، نقش بالقوه فن در بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها بود. با توجه به این موضوع، هدف دوم این پژوهش، بررسی تئوری اثر گردش اجباری هوا (ناشی از استفاده از فن) بر عملکرد آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته است.

۲. مشخصات کلی آب‌شیرین‌کن

در شکل ۱ نمای شماتیک سه‌بعدی از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته (ISS) به همراه فن و ماده تغییر فازدهنده نشان داده شده است. در این شکل برش طولی آب‌شیرین‌کن نیز نشان داده شده است. ابعاد و مشخصات آب‌شیرین‌کن ساخته شده در این تحقیق مشابه مقالات [۱۹، ۲۰] می‌باشد. در طراحی قبلی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته، صفحه جاذب تمام طول دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی را نمی‌پوشاند و یک فاصله (شکاف) ۲۰ سانتی‌متری بین بالای مجموعه جاذب و قسمت بالایی دستگاه و همچنین یک فاصله ۱۰ سانتی‌متری بین پایین مجموعه جاذب و قسمت پایینی دستگاه تعبیه شده است. در این مطالعه، شکاف بالایی با یک ورق فولادی گالوانیزه پوشیده شده است که در مرکز آن یک سوراخ دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر برای نصب فن تعبیه شده است. یک فن (مورد استفاده جهت تهویه فضاهای کوچک مانند سرویس بهداشتی) با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ برای ایجاد گردش اجباری هوا بین دو محفظه تبخیر و کندانسور استفاده شده است. در شکل ۲ عکسی از آب‌شیرین‌کن ساخته شده در حال آزمایش نشان داده شده است.

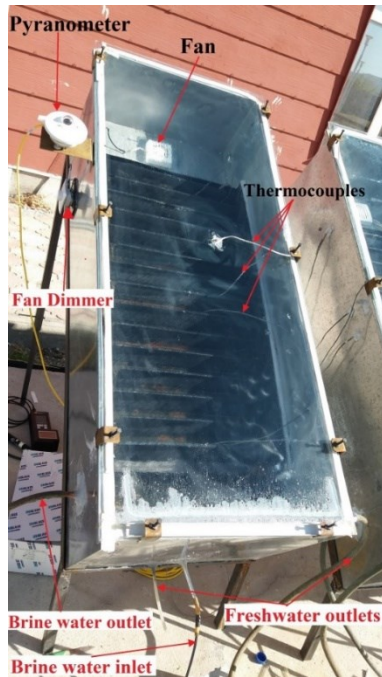
یک شیشه شفاف با ضخامت ۴ میلی‌متر، در قسمت بالایی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در انتهای صفحه جاذب یک حوضچه نسبتاً بزرگ‌تر قرار گرفته است که برای جمع‌آوری و تخلیه آب‌شور غلیظ شده به کار می‌رود. در محاسبات به منظور ساده‌سازی تعداد حوضچه‌ها برابر ۱۵ عدد در نظر گرفته شده است. محفظه‌های نگهداری ماده تغییرفازدهنده بین لایه عایق و صفحه جاذب قرار می‌گیرند (شکل ۲ را ببیند) و یک لایه عایق الاستومری به ضخامت ۲ سانتی‌متر روی ماده تغییرفازدهنده قرار گرفته است.

در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته، پرتوهای خورشید پس از عبور از پوشش شیشه‌ای به صفحه‌ی جاذب برخورد می‌کنند. بخش عمده‌ی انرژی تابشی توسط صفحه جاذب سیاه‌رنگ جذب و موجب افزایش دمای آن صفحه جاذب می‌شود. سپس قسمتی از این انرژی به آب شور درون حوضچه‌ها، هوای محفظه تبخیر، ماده تغییرفازدهنده (در صورت

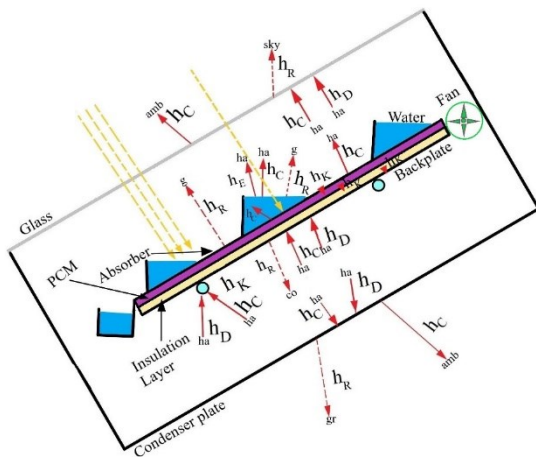
عددی مورد بررسی قرار دادند [۱۳]. عمارا و همکاران [۱۴] تأثیر استفاده از یک فن غوطه‌ور که توسط یک توربین بادی کار می‌کند، در یک دستگاه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی معمولی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از فن می‌تواند تولید آب شیرین را نسبت به دستگاه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی معمولی که فن ندارد، ۱۷ درصد بهبود بخشد. کاندال و همکاران [۱۵] به صورت تجربی دو پیکربندی دستگاه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شامل نوع A (که گردش هوای مرطوب و آب به صورت فعال و با استفاده از پمپ و فن انجام می‌شد) و نوع B (که گردش آب به صورت غیرفعال و گردش هوا به صورت فعال و به کمک فن انجام می‌شد) را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کندانسور نوع B عملکرد بهتری نسبت به کندانسور نوع A داشت. کابییل و همکاران [۱۶] تأثیر اضافه کردن یک کندانسور خارجی در یک آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی معمولی و استفاده از یک فن جهت گردش هوای مرطوب به داخل کندانسور را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند این عمل میزان آب شیرین تولیدی را حدود ۵۳ درصد افزایش می‌دهد. حسین و عبید جاسم [۱۷] یک طراحی نوآورانه برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی که شامل کندانسور جداگانه بود را معرفی و به بررسی روش‌های بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن از طریق اضافه کردن تیغه‌های راهنما و استفاده از فن‌ها پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اضافه کردن فن منجر به کاهش ۲۰ درصدی در تولید آب شیرین نسبت به همان طراحی بدون فن می‌شود. در یک مطالعه تجربی کندیل و همکاران [۱۸] به بررسی دو نوع کندانسور خارجی شامل حرکت فعال (جابجایی اجباری) بخار و آب و حرکت غیرفعال (جابجایی طبیعی) و حرکت فعال بخار آب بر عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای استاندارد پرداختند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ادغام فن و استفاده از مواد تغییرفازدهنده به دستگاه آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌تواند بر عملکرد آنها تأثیرگذار باشد. باین‌حال، میزان تأثیر بر عملکرد ثابت نیست و به نوع دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی، طراحی آن و پارامترهای عملیاتی بستگی دارد.

امیری [۱۹، ۲۰] یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته (ISS) مجهز به کندانسور غیرفعال را طراحی و به صورت تجربی در شرایط عملیاتی مختلف بررسی کرده است. نتایج نشان داد که این سامانه نسبت به نوع معمولی بین ۳۰ تا ۱۵۰ درصد عملکرد بهتری داشته است. با توجه به عملکرد بسیار خوب آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته، امیری [۲۱] یک مدل ریاضی برای این آب‌شیرین‌کن توسعه داده است این مدل بر اساس گردش طبیعی هوا در درون آب شیرین‌کن بنا شده بود و ماده تغییرفازدهنده در آن استفاده نشده بود. هرچند مطالعات فراوانی در مورد استفاده از مواد تغییرفازدهنده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مختلف و میزان تأثیر آن بر عملکرد این آب‌شیرین‌کن‌ها انجام شده است. میزان تأثیر مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها به پارامترهای زیادی من جمله طرح و نوع

سازنده و مدل	قدرت نامی (وات)	RPM_{max}	دبی حجمی (m^3/h)
دمنده VBX-10S2S	15	2400	70



شکل ۲: عکسی از آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته با فن و ماده تغییر فاز دهنده در حال آزمایش



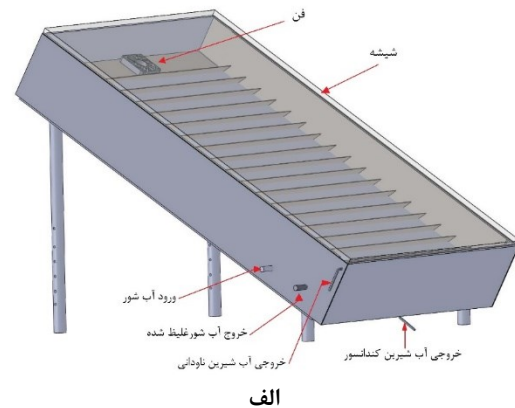
شکل ۳: پدیده‌های مختلف انتقال حرارت در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته با فن و ماده تغییر فاز دهنده

- تغییرات دمایی قسمت‌های مختلف و رطوبت هوا فقط در راستای طول آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته شده است.
- تحلیل به صورت گذرا انجام شده است.
- خواص ترموفیزیکی اجزا آب‌شیرین‌کن ثابت، خواص آب‌شور فقط تابع دما و خواص هوای مرطوب فقط تابع دما و رطوبت نسبی هستند.
- از گرادیان دما در جهت ضخامت اجزای مختلف صرف نظر شده است.

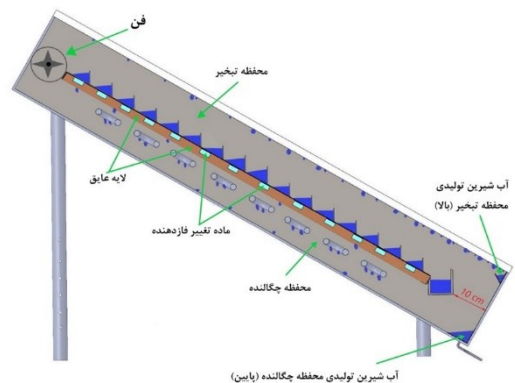
وجود) و لایه‌های اطراف منتقل می‌شود. در اثر گرم شدن آب، تبخیر افزایش یافته و هوای درون محفظه مرطوب و اشباع می‌گردد. این هوای گرم و مرطوب به صورت طبیعی یا اجباری (در صورت روشن بودن فن) به سمت محفظه کندانسور حرکت می‌کند. بخشی از بخار در تماس با سطح داخلی شیشه که دمایی پایین‌تری دارد، تقطیر شده و پوشش شیشه‌ای به عنوان سطح تقطیر اولیه عمل می‌کند. بخار باقی‌مانده در محفظه کندانسور بر روی صفحه‌ی کندانسور، صفحه پشتی و یا مبدل لوله‌ای تقطیر شده و به آب شیرین تبدیل می‌شود. مبدل لوله‌ای گرمای میعان را به آب شور ورودی منتقل کرده و آن را پیش‌گرم می‌کند، در حالی که صفحه کندانسور گرما را به محیط خارج منتقل می‌نماید.

۳. مدل حرارتی (ترمودینامیکی) آب‌شیرین‌کن

در این بخش، یک مدل حرارتی گذرا برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته مجهز به فن توسعه داده شده است. در شکل مکانیسم‌های مختلف انتقال حرارت در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پله‌ای بهبودیافته مجهز به فن نمایش داده شده است. در این شکل تعامل پیچیده و هم‌زمان مکانیسم‌های مختلف انتقال حرارت و جرم در آب‌شیرین‌کن به تصویر کشیده شده است. در توسعه مدل حرارتی فرضیات زیر به کار گرفته شده‌اند:



الف



ب

شکل ۱: شماتیکی از نمای بیرونی و برش طولی آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته به همراه نام اجزا

جدول ۱: مشخصات فن مورد استفاده در این تحقیق

۳-۱- پوشش شیشه‌ای

پوشش شیشه‌ای با جذب تابش خورشید، دریافت تابش از آب‌شور و صفحه جاذب، از طریق جابجایی حرارت و میعان از هوای مرطوب انرژی دریافت می‌کند. بخشی از این انرژی از طریق جابجایی به محیط و تابش به آسمان تلف شده و بخشی دیگر به صورت حرارت محسوس در شیشه ذخیره می‌شود. اعمال معادله بقای انرژی برای حجم کنترل نام معادله زیر را به دست می‌دهد [۲۱]:

$$(MC_V)_g^i \frac{dT_g^i}{dt} = A_g^i \alpha_g I_T + (h_R A)_{w-g}^i (T_w^i - T_g^i) + (h_R A)_{ab-g}^i (T_{ab}^i - T_g^i) + ((h_C + h_D) A)_{ha-g}^i (T_{ha}^i - T_g^i) - (h_C A)_{g-amb}^i (T_g^i - T_{amb}) - (h_R A)_{g-sky}^i (T_g^i - T_{sky}) \quad (2)$$

که در آن A ، α ، h_R ، h_C ، h_D ، I_T ، t ، T ، C_V ، M به ترتیب نشان‌دهنده جرم، ظرفیت حرارتی ویژه حجم ثابت، دما، زمان، شدت تابش خورشیدی روی پوشش شیشه‌ای، ضریب انتقال حرارت تابشی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، ضریب انتقال حرارت میعان، ضریب جذب و مساحت می‌باشند. علاوه بر این در معادله بالا، پایین نویسه‌های g ، w ، ab ، ha ، amb ، sky و بالانویس i به ترتیب مخفف پوشش شیشه‌ای، آب، صفحه جاذب، هوای مرطوب، آسمان، محیط و حجم کنترلی نام هستند. ضرایب انتقال حرارت و پارامترهای به کار رفته در معادله فوق در مرجع [۲۱] ارائه شده است و به منظور حفظ اختصار در این متن ارائه نشده‌اند.

۳-۲- صفحه جاذب

صفحه جاذب، انرژی را از طریق جذب تابش خورشیدی دریافت می‌کند و این انرژی را از طریق انتقال حرارت جابجایی به آب‌شور داخل حوضچه، هدایت حرارتی به ماده تغییر فازدهنده (یا در صورت نبود آن، به عایق حرارتی)، تابش حرارتی به پوشش شیشه‌ای، و جابجایی حرارتی به هوای مرطوب در حال گردش با محیط و اجزاء اطراف خود مبادله می‌نماید. به صورت ریاضی، معادله بقای انرژی برای حجم کنترلی نام صفحه جاذب به شرح زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$(MC_V)_{ab}^i \frac{dT_{ab}^i}{dt} = A_g^i \alpha_{ab} \tau_g \tau_w I_T - (h_C A)_{ab-w}^i (T_{ab}^i - T_w^i) - (h_R A)_{ab-g}^i (T_{ab}^i - T_g^i) - (h_K A)_{ab-PCM}^i (T_{ab}^i - T_{PCM}^i) - (h_C A)_{ab-ha}^i (T_{ab}^i - T_{ha}^{h,i}) \quad (3)$$

در معادله فوق زیرنویس PCM نشان‌دهنده ماده تغییر فازدهنده می‌باشد. همچنین h_K ضریب جابجایی معادل ضریب رسانایی حرارتی می‌باشد و برای انتقال حرارت بین صفحه جاذب و ماده تغییر فازدهنده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(h_K)_{ab-PCM}^i = \frac{k_{PCM}}{0.5Th_{PCM}} \quad (4)$$

که Th و k به ترتیب ضریب انتقال حرارت رسانایی و ضخامت ماده تغییر فازدهنده است که در راستای آن انتقال حرارت رسانایی درون PCM اتفاق می‌افتد.

۵. تقسیم‌بندی حجم کنترل‌ها در راستای طول برابر تعداد حوضچه‌ها در نظر گرفته شده است.

۶. در محفظه‌ی تبخیر، جرم دیواره‌های جانبی به صورت جرم پوشش شیشه‌ای مدل شده، و در محفظه‌ی کندانسور، جرم دیواره‌های جانبی به صورت جرم صفحه‌ی کندانسور مدل شده است. لازم به ذکر است هر چند این فرض خطاهایی را، خصوصاً در تخمین دمای شیشه که در ساعاتی در معرض تابش خورشید قرار دارد در حالی که لبه‌ها تابش دریافت نمی‌کنند، ایجاد می‌نماید ولی به دلیل کاهش تعداد معادلات و در نتیجه کاهش پیچیدگی مسئله انجام شده است.

۷. دمای آب‌شور خروجی از هر حوضچه برابر دمای آب آن حوضچه و در اولین حوضچه برابر دمای آب خروجی از مبدل حرارتی می‌باشد.

در مطالعه حاضر مدل‌سازی سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از معادلات بقای انرژی به صورت گذرا و یک‌بعدی انجام گرفته است. معادلات بقای انرژی برای همه اجزای آب‌شیرین‌کن شامل صفحه جاذب، آب‌شور، پوشش شیشه‌ای، ماده تغییر فازدهنده (در صورت وجود)، لایه عایق الاستومری، صفحه پستی، و صفحه کندانسور در حالت گذرا نوشته شده است. با بررسی مکانیسم‌های انتقال جرم و انرژی بین قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن می‌توان عملکرد آن را توصیف کرد. با توجه به اینکه تمامی روش‌های انتقال حرارت در درون آب‌شیرین‌کن اتفاق می‌افتند و همچنین از آنجایی که در پدیده‌های تقطیر و میعان در درون دستگاه انتقال جرم و حرارت به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتند مدل‌سازی آب‌شیرین‌کن چالش برانگیز است. مکانیسم‌های انتقال حرارت در دستگاه، شامل انتقال حرارت رسانایی بین لایه‌های مختلف ($\dot{Q}_K = h_K A \Delta T = \frac{kA}{L} \Delta T$)، انتقال حرارت جابجایی بین هوا (هوای محیط و یا هوای مرطوب داخل دستگاه) و قسمت‌های مختلف ($\dot{Q}_C = h_C A \Delta T$)، انتقال حرارت تابشی ($\dot{Q}_R = h_R A \Delta T$) و نهایتاً انتقال حرارت در هنگام تغییر فاز شامل تبخیر ($\dot{Q}_E = h_E A \Delta T$) و تقطیر و یا میعان ($\dot{Q}_D = h_D A \Delta T$) می‌باشند. در شکل این مکانیسم‌ها نشان داده شده است. قانون اول ترمودینامیک یا همان قانون بقای انرژی برای یک حجم کنترل که از طریق انتقال حرارت و جرم با محیط تعامل دارد به صورت زیر می‌باشد:

$$MC_V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{Q} - \sum_{out} \dot{Q} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (1)$$

که در این رابطه M ، C_V ، \dot{m} و h به ترتیب جرم، گرمای ویژه حجم ثابت، دبی جرمی سیال ورودی و یا خروجی از حجم کنترل و آنتالپی سیال ورودی و یا خروجی می‌باشند. همچنین $\sum_{in} \dot{Q}$ و $\sum_{out} \dot{Q}$ به ترتیب مجموع انرژی‌های ورودی و خروجی از حجم کنترل می‌باشند. معادله فوق برای همه اجزای آب‌شیرین‌کن قابل استفاده می‌باشد و در ادامه برای هر کدام از اجزا این معادله ارائه خواهد شد.

۳-۳- آب شور درون حوضچه‌ها

(۷)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{PCM}^i}{dt} = \dot{Q}_{net} / (MC_{V,S})_{PCM}^i \quad T_{PCM}^i < T_{melt} \\ T_{PCM}^i = T_{PCM,melt} + \frac{(m_{PCM,liq})^i}{(M_{PCM})^i} \delta \quad T_{melt} \leq T_{PCM}^i \leq T_{melt} + \delta \\ (m_{PCM,liq})^{i,t} = (m_{PCM,liq})^{i,t-dt} + \frac{\dot{Q}_{net}}{h_{SL}} \\ \frac{dT_{PCM}^i}{dt} = \dot{Q}_{net} / (MC_{V,L})_{PCM}^i \quad T_{PCM}^i > T_{melt} \end{array} \right.$$

در معادله فوق، زیرنویس *ins* نشان‌دهنده لایه عایق می‌باشد.

با توجه به اینکه ماده تغییر فاز دهنده، بعد از رسیدن به دمای ذوب تغییر فاز می‌دهد باید در انتهای هر گام زمانی بررسی نمود که با توجه به میزان حرارت منتقل شده و یا گرفته شده آیا ماده تغییر فاز دهنده در همان فاز اولیه می‌ماند و یا تغییر فاز می‌دهد. در این تحقیق از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. مشخصات و خواص پارافین مورد استفاده در جدول ارائه شده است. در شکل عکسی از مجموعه صفحه جاذب شامل حوضچه‌ها، محفظه‌های ماده PCM و لایه عایق و صفحه پشتی ارائه شده است.

۳-۵- لایه عایق

لایه عایق انرژی را به طریق هدایت حرارتی از ماده تغییر فاز دهنده (و در نبود آن از صفحه جاذب) دریافت می‌کند، بخشی از آن را از طریق انتقال حرارت رسانایی به صفحه پشتی منتقل کرده و مابقی انرژی را به صورت حرارت محسوس ذخیره می‌کند، که این امر منجر به تغییر دما در عایق می‌شود. به صورت ریاضی:

$$(MC_V)_{ins}^i \frac{dT_{ins}^i}{dt} = (h_K A)_{PCM-ins}^i (T_{PCM}^i - T_{ins}^i) - (h_K A)_{ins-bp}^i (T_{ins}^i - T_{bp}^i) \quad (۸)$$

در معادله فوق، زیرنویس *bp* نشان‌دهنده صفحه پشتی می‌باشد. معادله فوق بر اساس این فرض که مقاومت حرارتی صفحه پشتی و جاذب به طور قابل توجهی کمتر از مقاومت حرارتی لایه عایق است، به دست آمده است.

جدول ۲: مشخصات و خواص ترموفیزیکی موم پارافین

ویژگی	واحد	مقدار (واحد)
چگالی جامد	kg/m ³	820-840
لزجت (ویسکوزیته)	cSt	3/8- 4/2
نقطه اشتعال	°C	190-210
محتوی روغن	%	ماکزیمم 1/5
نقطه ذوب	°C	60-62
نقطه انجماد	°C	

۳-۶- صفحه پشتی

صفحه پشتی حرارت را از لایه عایق به روش رسانایی و از هوای مرطوب فضای کن‌اندسور به روش جابجایی و میعان (حرارت نهان آبشیرین کن‌های) دریافت می‌نماید و قسمتی از آن را به روش تابشی

آب شور درون حوضچه‌ها انرژی خود را از طریق جذب بخشی از تابش خورشیدی، دریافت حرارت از صفحه جاذب به صورت جابجایی و آنتالپی ناشی از جریان ورودی و خروجی آب شور به حوضچه دریافت می‌نماید. بخشی از این انرژی از طریق جابجایی و تبخیر به هوای مرطوب و از طریق تابش به پوشش شیشه‌ای منتقل می‌شود، و بخش باقی مانده به صورت حرارت محسوس در آب ذخیره می‌گردد. به کارگیری قانون اول ترمودینامیک، یعنی بقای انرژی، معادله زیر را برای آب شور درون حجم کنترلی *lam* (حوضچه) به دست می‌دهد [۲۱]:

$$(MC_V)_w^i \frac{dT_w^i}{dt} = A_g^i \tau_g \alpha_w I_T + (h_C A)_{ab-w}^i (T_{ab}^i - T_w^i) + (\dot{m} C_p)_w (T_w^{i,in} - T_w^{i,out}) - (h_C + h_E) A)_{w-ha}^i (T_w^i - T_{ha}^{h,i}) - (h_R A)_{w-g}^i (T_w^i - T_g^i) \quad (۵)$$

در معادلات فوق، T_w^{out} و T_w^{in} ، $C_{p,w}$ ، \dot{m}_w به ترتیب دبی آب شور ورودی به دستگاه، گرمای ویژه فشار ثابت آب شور، دمای آب ورودی به هر حجم کنترل (حوضچه) و دمای آب خروجی از هر حجم کنترل که برابر دمای آب حوضچه در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این بالانویس‌های *in* و *out* به ترتیب نشان‌دهنده ورودی و خروجی به حجم کنترل می‌باشند. همچنین h_E ضریب انتقال حرارت جابجایی معادل فرآیند تبخیر می‌باشد.

۳-۴- ماده تغییر فاز دهنده

در آزمایش‌ها، ماده تغییر فاز دهنده درون محفظه‌هایی با فواصل مشخص از یکدیگر نصب شده و این محفظه‌ها زیر صفحه جاذب جای گرفته‌اند. در این تحقیق و برای ساده‌سازی مدل‌سازی، فرض شده که ماده تغییر فاز دهنده به صورت یک پارچه و پیوسته در زیر صفحه جاذب گسترده شده است. ماده تغییر فاز دهنده انرژی را از صفحه جاذب دریافت می‌کند. بخشی از این انرژی از طریق هدایت حرارتی با لایه عایق مبادله می‌شود و مابقی در PCM ذخیره می‌شود. در ابتدای فرآیند، تا زمانی که دمای PCM به دمای ذوب نرسیده، انرژی به صورت حرارت محسوس در آن ذخیره می‌شود. با رسیدن دمای PCM به دمای ذوب، فرآیند ذوب آغاز شده و از آن پس انرژی دریافتی به صورت گرمای نهان ذوب در ماده ذخیره می‌گردد. پس از ذوب کامل PCM، مجدداً انرژی به صورت حرارت محسوس در فاز مایع ذخیره می‌شود. معادله بقای انرژی برای ماده تغییر فاز دهنده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{Q}_{net} = (h_K A)_{ab-PCM}^i (T_{ab}^i - T_{PCM}^i) - (h_K A)_{PCM-ins}^i (T_{PCM}^i - T_{ins}^i) \quad (۶)$$

$$\frac{d(T_{ha}^{h,i})}{dt} = \{(h_C A)_{ab-ha}^i (T_{ab}^i - T_{ha}^{h,i}) + \dot{m}_{da}^{fan} (h_{ha}^{h,in} - h_{ha}^{h,out}) + ((h_C + h_E) A)_{w-ha}^i (T_w^i - T_{ha}^{h,i}) - m_{da}^{h,i} u_v^{h,i} \frac{dw_{ha}^{h,i}}{dt} - ((h_C + h_D) A)_{ha-g}^i (T_{ha}^{h,i} - T_g^i)\} / [m_{da}^{h,i} (C_{V,da} + w_{ha}^{h,i} a_1)] \quad (11)$$

$$m_{da}^{h,i} \frac{dw_{ha}^{h,i}}{dt} = \dot{m}_{da} (w_{ha}^{h,in} - w_{ha}^{h,out}) + \dot{m}_E^{h,i} - \dot{m}_{D,g}^{h,i} \quad (12)$$

که \dot{m}_D ، \dot{m}_E ، h_{fg} ، \dot{m}_{da}^{fan} جرمی هوای در حال گردش (توسط فن و یا گردش طبیعی)، حرارت نهان تبخیر آب، نرخ تبخیر آب از سطح، و نرخ میعان آب را نشان می‌دهند. همچنین u ، h و w_{ha} به ترتیب انرژی داخلی کل هوای مرطوب، نرخ کل آنتالپی سیال در حال جریان، انرژی داخلی ویژه، آنتالپی ویژه به ازای واحد جرم هوای خشک و نسبت رطوبت هستند. زیرنویس‌های da و v به ترتیب به هوای خشک و بخار آب اشاره دارند. m_{da} و \dot{m}_{da} جرم هوای خشک درون حجم کنترل و دبی جرمی هوای خشک عبوری از حجم کنترل هستند. m_{da} با استفاده از قانون گازهای ایده‌آل محاسبه می‌شود. در معادله بالا $a_1 = 1.3047E3$ می‌باشد [۲۱]. بعد از حل معادلات و معلوم شدن دماها، نرخ جرمی تبخیر و یا میعان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{h_E A \Delta T}{h_{fg}} \text{ or } \frac{h_D A \Delta T}{h_{fg}} \quad (13)$$

۳-۹- هوای مرطوب در محفظه کندانسور (رطوبت‌زدا)

با به‌کارگیری معادلات بقاء انرژی و جرم برای محفظه‌ی کندانسور و استفاده از فرضیات مربوط به محفظه‌ی تبخیر، معادله‌های زیر برای هوای مرطوب در این محفظه به دست می‌آید:

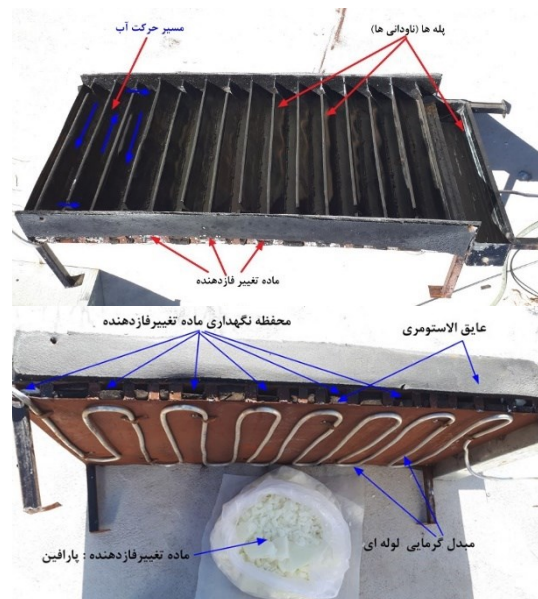
$$\frac{d(T_{ha}^{dh,i})}{dt} = \{-(h_C + h_D) A)_{ha-bp}^i (T_{ha}^{dh,i} - T_{bp}^i) - ((h_C + h_D) A)_{ha-cp}^i (T_{ha}^{dh,i} - T_{cp}^i) + \dot{m}_{da}^{fan} (h_{ha}^{dh,in} - h_{ha}^{dh,out}) - ((h_C + h_D) A)_{ha-HE}^i (T_{ha}^{dh,i} - T_{HE}^i) - m_{da}^{dh,i} u_v^{dh,i} \frac{dw_{ha}^{dh,i}}{dt}\} / [m_{da}^{dh,i} (C_{V,da} + w_{ha}^{dh,i} a_1)] \quad (14)$$

$$m_{da}^{dh,i} \frac{dw_{ha}^{dh,i}}{dt} = \dot{m}_{da}^{fan} (w_{ha}^{dh,in} - w_{ha}^{dh,out}) - \dot{m}_{D,bp}^{dh,i} - \dot{m}_{D,cp}^{dh,i} - \dot{m}_{D,HE}^{dh,i} \quad (15)$$

۳-۱۰- حل عددی معادلات

به‌کارگیری معادلات بقاء انرژی و جرم برای اجزاء مختلف آب‌شیرین‌کن منجر به تشکیل سیستمی از معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی برای دماها و رطوبت‌های ویژه شد. این معادلات در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی و به‌صورت هم‌زمان حل شده است. در هر گام زمانی، مقادیر مجهول در تمامی حجم‌های کنترل به‌صورت هم‌زمان و از طریق فرآیند تکراری محاسبه می‌شوند. برای دستیابی به همگرایی، از گام زمانی ۰.۱ ثانیه بهره گرفته شده است. برای حل

به صفحه کندانسور منتقل می‌نماید. به‌صورت ریاضی انتقال حرارت‌های ورودی و خروجی به صفحه پشتی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۲۱]:



شکل ۴: عکسی از مجموعه صفحه جاذب و محل‌های تعبیه‌شده برای ماده تغییر فاز دهنده و ماده PCM

$$(MC_V)_{bp}^i \frac{dT_{bp}^i}{dt} = (h_K A)_{ins}^i (T_{ins}^i - T_{bp}^i) + ((h_C + h_D) A)_{ha-bp}^i (T_{ha}^{dh,i} - T_{bp}^i) - (h_R A)_{bp-cp}^i (T_{bp}^i - T_{cp}^i) \quad (9)$$

در معادلات فوق، زیرنویس cp نشان‌دهنده صفحه کندانسور (چگالنده) و بالانویس dh نشان‌دهنده محفظه رطوبت‌زدا (محفظه کندانسور) می‌باشند.

۳-۷- صفحه کندانسور

صفحه کندانسور انرژی را از طریق تابش از صفحه پشتی و از طریق جابجایی و میعان ناشی از هوای مرطوب در حال حرکت درون محفظه کندانسور دریافت می‌کند. مقداری از انرژی ورودی از طریق جابجایی به هوای محیط و از طریق تابش به زمین منتقل می‌شود و مابقی در صفحه کندانسور ذخیره می‌شود. از نظر ریاضی این انتقال حرارت‌ها را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$(MC_V)_{cp}^i \frac{dT_{cp}^i}{dt} = (h_R A)_{bp-cp}^i (T_{bp}^i - T_{cp}^i) - (h_R A)_{cp-gr}^i (T_g^i - T_{gr}^i) + ((h_C + h_D) A)_{ha-cp}^i (T_{ha}^{dh,i} - T_{cp}^i) - (h_C A)_{cp-amb}^i (T_{cp}^i - T_{amb}^i) \quad (10)$$

در معادله فوق، gr نشان‌دهنده زمین می‌باشد. در این تحقیق دمای سطح زمین برابر دمای محیط فرض شده است.

۳-۸- هوای مرطوب در محفظه تبخیر

با اعمال معادلات بقاء انرژی و جرم برای هوای مرطوب در محفظه بخار (تبخیر) و ساده‌سازی‌های معرفی شده در [۲۱] معادلات زیر به دست می‌آید:

آب‌شور ورودی به مقدار ثابت ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم شده بود. در این آزمایش‌ها، دمای اجزای مختلف از جمله آب‌شور، صفحه جاذب، و پوشش شیشه‌ای با استفاده از سه ترموکوپل نوع K در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شد و تولید آب شیرین نیز به صورت ساعتی ثبت گردید. تولید تجمعی شبانه تنها یک‌بار، در صبح روز بعد از هر آزمایش، اندازه‌گیری می‌شد. برای بررسی تأثیر جریان هوا، از فن کم‌فشار متصل به دیمر استفاده شد و سه حالت ۱-دیمر خاموش ($Fan = off$) و یا گردش طبیعی هوا در روزهای ۱۹ و ۲۰ خرداد (۹ و ۱۰ ژوئن)، ۲-دیمر در نیمه‌ی توان ($Fan = 0.5RPM_{max}$) و یا گردش اجباری متوسط در روزهای ۲۱ و ۲۲ خرداد (۱۱ و ۱۲ ژوئن) و ۳-دیمر در حداکثر توان ($Fan = RPM_{max}$) و یا بیشترین جریان هوای اجباری در روزهای ۲۳ و ۲۴ خرداد (۱۳ و ۱۴ ژوئن) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مدل عددی، نرخ جریان هوا برای سناریوی همرفت طبیعی ($Fan = off$) با استفاده از رابطه ارائه‌شده در مرجع [۲۱] و ۴ برابر کردن کل مقاومت جریان سیال در برابر حرکت، به دلیل تغییرات در آب شیرین کن به دست می‌آید. در مدل عددی، نرخ جریان هوا برابر با ۰.۰۴ کیلوگرم بر ثانیه برای نیمه‌توان فن ($Fan = 0.5RPM_{max}$) و ۰.۰۸ کیلوگرم بر ثانیه برای توان کامل فن ($Fan = RPM_{max}$) در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های ارائه‌شده در ادامه، به‌منظور ساده‌سازی نمایش از نمادها و یا عبارات $Exp.$ ، bot ، mid و top به ترتیب برای نمایش مقادیر تجربی، پایین، وسط و بالا استفاده شده است.

۴. نتایج و بحث

برای اطمینان از صحت مدل حرارتی توسعه‌یافته برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی، لازم است پیش از به‌کارگیری آن در تحلیل عملکرد آب شیرین کن، اعتبار آن مورد ارزیابی قرار گیرد. از آنجاکه در فرآیند مدل‌سازی از برخی فرضیات استفاده شده، مقایسه نتایج مدل با داده‌های دقیق و قبل‌اطمینان تجربی ضروری است. بدین منظور، همانطور که گفته شد یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته طراحی و ساخته شده که در آن از ماده تغییر فاز دهنده (PCM) و یک فن برای ایجاد گردش اجباری هوا استفاده شده است. این سامانه تحت شرایط واقعی در سه روز متوالی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج به‌دست‌آمده برای اعتبارسنجی مدل به کار رفته است. شایان ذکر است در اغلب مطالعات پیشین، صحت‌سنجی مدل‌های حرارتی تنها در بازه‌ی زمانی چند ساعت یا یک روز انجام شده است، درحالی‌که در این پژوهش، مدل برای چندین روز متوالی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به هزینه بر و زمان‌بر بودن تغییرات طراحی یا شرایط عملکردی آب شیرین کن، در نمونه آزمایشی فقط از یک نوع پارافین با خواص ترموفیزیکی مشخص، جرم معین و دمای ذوب ثابت استفاده شده است. لذا برای بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف PCM بر عملکرد

معادلات دیفرانسیل از روش صریح مرتبه اول استفاده شده است. در هر گام زمانی، دماهای جاذب، آب حوضچه، ماده تغییر فاز دهنده، لایه عایق، صفحه پشتی، صفحه کندانسور و همچنین دما و رطوبت ویژه هوای مرطوب در هر دو محفظه تبخیر و کندانسور برای تمام حجم‌های کنترلی به‌روزرسانی می‌شوند. مقادیر خواص ترموفیزیکی و ابعاد مورد استفاده در مدل‌سازی که در این تحقیق ذکر نشده‌اند در [۲۱] ارائه شده است و برای جلوگیری از طول شدن متن در اینجا ذکر نشده‌اند. با معلوم بودن شرایط مرزی و شرط اولیه برنامه رایانه‌ای یک دوره ۲۴ ساعته را از زمان شروع واقعی آزمایش (حدود ساعت ۷ صبح) شبیه‌سازی می‌نماید.

پس از حل معادلات و محاسبه دما و نرخ انتقال حرارت در قسمت‌های مختلف میزان آب شیرین تولیدی ساعتی برحسب میلی‌لیتر بر ساعت از رابطه $V_F = \dot{m}_D \times 10^6 / \rho_w \times 3600$ و میزان تجمعی آب شیرین تولیدی از رابطه $V_F^C = 10^6 / \rho_w \times 3600 \int_0^t \dot{m}_D dt$ محاسبه می‌شود. میزان آب شیرین تجمعی V_F^C نشان‌دهنده میزان آب شیرین تولیدی از زمان شروع آزمایش تا زمان t می‌باشد. علاوه بر این میزان آب شیرین تولیدی بر روی شیشه (محفظه تبخیر) با بالانویس gl و مجموع آب شیرین تولیدی در محفظه کندانسور که شامل آب شیرین تولیدی توسط مبدل حرارتی، صفحه پشتی و صفحه کندانسور می‌شود با بالانویس con نمایش داده می‌شود. بازه حرارتی روزانه آب شیرین کن را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\eta(\%) = \frac{V_F^{day} \times 10^{-6} \times \rho \times h_{fg}}{E_{Sun}^{day}} \times 100 \quad (16)$$

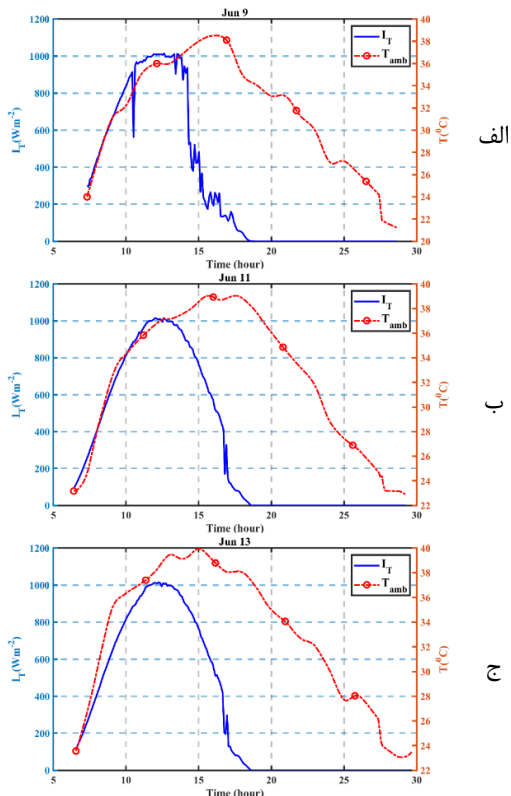
که در معادله بالا V_F^{day} ، ρ و $E_{Sun}^{day} = \int_{day} I_T A dt$ به ترتیب کل

حجم آب شیرین تولیدی روزانه آب‌شیرین‌کن بر حسب میلی‌لیتر، چگالی آب شیرین و کل انرژی خورشیدی که در طول روز به قسمت بیرونی پوشش شیشه‌ای می‌تابد، می‌باشند. به‌منظور سنجش دقت مدل حرارتی در تخمین کمیت‌های مختلف از درصد خطای نسبی مطلق ($E_{rel}(\%)$) و ریشه (جذر) میانگین مربعات خطا (RSME) استفاده شده است.

۳-۱۱- شرح آزمایش‌های انجام شده

آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته همراه با PCM که از فن برای گردش هوای اجباری بهره می‌برد، در محوطه دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته (عرض جغرافیایی ۳۰.۰۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۷.۲۷ درجه شرقی) و در روزهای ۱۹ خرداد (۹ ژوئن) تا ۲۴ خرداد (۱۴ ژوئن) انجام شده است.

برای بررسی تأثیر نرخ‌های مختلف گردش هوای مرطوب بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبودیافته، آزمایش‌هایی در سه نرخ دبی جرمی هوا انجام شد. به‌منظور کاهش اثر نوسانات آب‌وهوایی، هر آزمایش برای یک نرخ جریان هوا در دو روز متوالی تکرار گردید. دبی



شکل ۵: دمای هوای محیط و شدت تابش خورشید در روزهای آزمایش

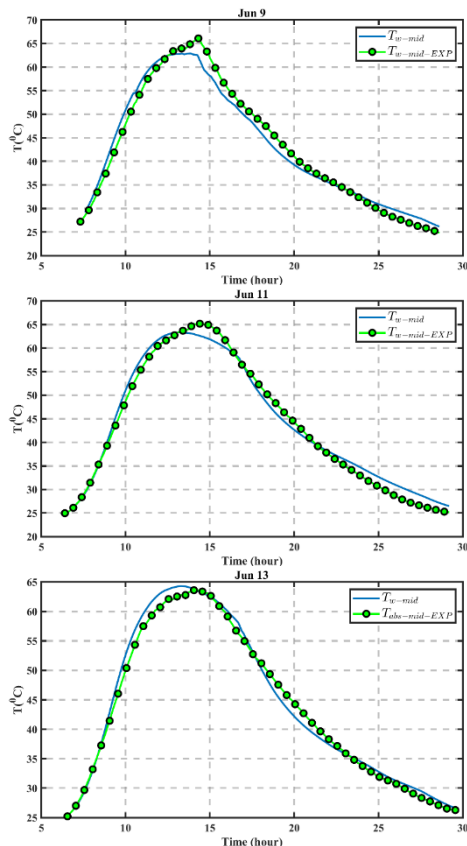
در جدول و جدول به ترتیب ریشه (جذر) میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ و درصد خطای نسبی مطلق در تخمین دمای قسمت‌های مختلف دستگاه آب‌شیرین‌کن ارائه شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل حرارتی توسعه داده‌شده قادر است دمای آب‌شور درون حوضچه وسط و دمای صفحه جاذب را با جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۲.۲ درجه سانتی‌گراد و با میانگین درصد خطای نسبی مطلق کمتر از ۴.۱ درصد پیش‌بینی نماید. به همان دلایلی که در بالا به آن اشاره شد تخمین دمای پوشش شیشه‌ای با دقت کمتری انجام شده است. بیشینه خطا مجذور میانگین مربعات در تخمین دمای شیشه برابر ۸.۲ درجه سانتی‌گراد و بیشینه میانگین درصد خطای نسبی مطلق در تخمین این دما ۱۹ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است همان‌طور که اشاره شد خطای نسبتاً زیاد در تخمین دمای شیشه نه ناشی از عدم دقت مدل توسعه داده شده بلکه ناشی از فرضیات به کار گرفته‌شده است. به‌عبارت‌دیگر چنانچه در آزمایش‌ها به‌جای اینکه فقط دمای شیشه اندازه‌گیری شود دمای لبه‌های کناری نیز اندازه‌گیری می‌شد و میانگین دمای پوشش شیشه‌ای و دمای لبه‌ها حساب‌شده و همانند مدل‌سازی این دما به‌عنوان دمای پوشش شیشه‌ای در نظر گرفته می‌شد قطعاً خطای بین نتایج تجربی و مدل‌سازی بسیار کمتر می‌شد. لازم به ذکر است تجمیع جرم لبه‌ها با جرم پوشش شیشه‌ای در محفظه تبخیر به دلیل کاهش تعداد معادلات و کاهش پیچیدگی مسئله انجام شده است.

آب‌شیرین‌کن، از مدل عددی توسعه‌یافته بهره‌گرفته خواهد شد تا امکان تحلیل دقیق‌تر با هزینه‌ی کمتر فراهم شود.

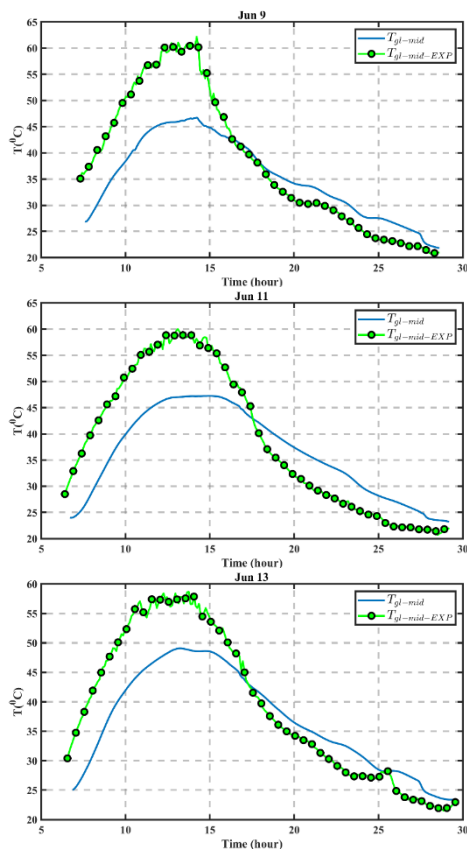
۴-۱- اعتبارسنجی مدل حرارتی

برای اطمینان از توانایی مدل در پیش‌بینی ویژگی‌های آب‌شیرین‌کن، مقایسه‌ای بین نتایج عددی و داده‌های تجربی انجام خواهد شد. در فرآیند مدل‌سازی، تمامی پارامترهای عملیاتی به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که با مقادیر مربوط به آزمایش‌ها مطابقت داشته باشند. بدین منظور به جزء برای مواردی که بعد مشخص می‌شود، ابعاد، مشخصات و خواص استفاده‌شده در مدل حرارتی برابر مقادیر تجربی خواهد بود. مقادیر تابش خورشید و دمای محیط برابر مقادیر متناظر در آزمایش‌ها انجام‌شده در هر روز مشخص می‌باشند. از آنجایی که سرعت باد در محل آزمایش اندازه‌گیری نشده بود مقدار سرعت باد در همه آزمون‌ها ثابت و برابر ۱.۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

با توجه به تشابه نتایج و جهت جلوگیری از طولانی شدن غیرضروری گزارش، جزئیات مقایسه بین نتایج تجربی و مدل‌سازی فقط برای روزهای ۹ (۱۹ خرداد)، ۱۱ (۲۱ خرداد) و ۱۳ ژوئن (۲۴ خرداد) ارائه‌شده است. در شکل تغییرات دمای محیط و شدت تابش خورشید برای این سه روز نمایش داده شده است. بررسی این شکلها نشان می‌دهد که در روز ۹ ژوئن تغییرات ناگهانی در روند میزان شدت تابش وجود داشته و آسمان در حوالی ظهر و بعدازظهر گاهی نیمه‌ابری می‌شده است. در روزهای ۱۱ و ۱۳ ژوئن آسمان تقریباً صاف بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌جز اختلاف در شدت تابش در روز ۹ ژوئن، مقدار تابش خورشیدی و دمای محیط در سه روز مورد بررسی تقریباً مشابه است. در شکل، شکل و شکل مقایسه بین نتایج تجربی و نتایج مدل‌سازی برای روزهای آزمایش نشان داده شده است. در این شکل‌ها دمای صفحه جاذب، آب‌شور و پوشش شیشه‌ای حاصل از مدل‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی دمای صفحه جاذب و آب‌شور را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند، اما در مورد دمای پوشش شیشه‌ای دقت کمتری دارد. این اختلاف عمدتاً به روش اندازه‌گیری دما در آزمایش‌ها و فرضیات مدل‌سازی بازمی‌گردد. در حالی که دمای شیشه در آزمایش‌ها از مرکز سطح بیرونی آن ثبت شده، مدل عددی میانگین دمای پوشش شیشه‌ای و دیواره‌های جانبی را لحاظ می‌کند. همچنین، در مدل جرم دیواره‌های فلزی نیز به جرم شیشه افزوده شده که به دلیل عدم دریافت تابش مستقیم، دمای محاسبه‌شده را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر، سطح بیرونی شیشه که محل نصب ترموکوپل است، سریع‌تر از لایه‌های داخلی سرد می‌شود و در معرض نوسانات ناشی از باد قرار دارد؛ در نتیجه، دمای ثبت‌شده کمتر از مقدار واقعی است. این عوامل موجب می‌شوند که پس از غروب، دمای مدل‌سازی شده بالاتر از دمای اندازه‌گیری شده باشد، هرچند با کاهش تابش خورشید، این اختلاف کمتر می‌شود اما کاملاً از بین نمی‌رود.



شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی و نتایج حل عددی دمای آب در حوضچه وسط در روز ۹ ژوئن

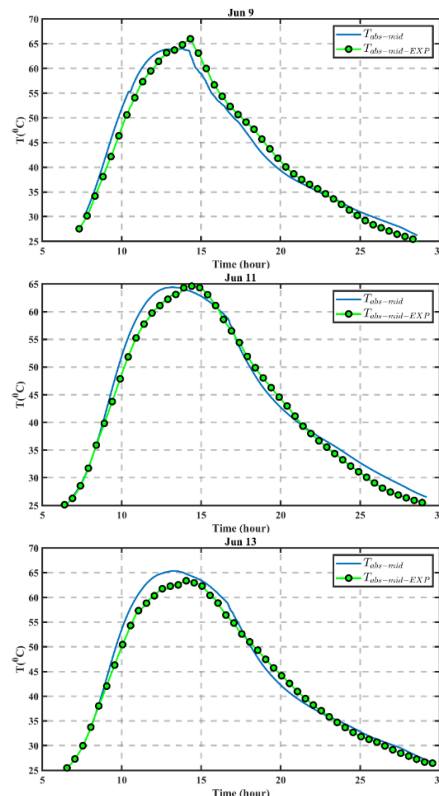


شکل ۹: مقایسه نتایج تجربی و نتایج حل عددی دمای پوشش شیشه‌ای بالای حوضچه وسط در روزهای آزمایش

الف

ب

ج



الف

ب

ج

شکل ۷: مقایسه نتایج تجربی و نتایج حل عددی دمای صفحه جاذب در حوضچه وسط در روزهای آزمایش در ماه ژوئن

جدول ۳: خطای جذر میانگین مربعات در تخمین دمای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن بر حسب درجه سانتی‌گراد

جزء	Jun 9	Jun 10	Jun 11	Jun 12	Jun 13	Jun 14
صفحه جاذب	2/0	2/0	1/8	1/8	1/9	2/3
آب‌شور	2/0	2/1	1/7	1/5	1/4	1/7
شیشه	7/5	8/1	7/7	7/0	6/2	6/2

الف

ب

ج

بررسی تغییرات دما و میزان مقدار ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده در طول دوره آزمایش به ترتیب در شکل و شکل نشان داده شده است. در این دو شکل خطوط دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده و میزان جرم کلی ماده تغییر فاز دهنده که در زیر هر حوضچه تعبیه شده است به صورت خطوط γ ثابت نشان داده شده است. این نمودارها مربوط به ماده تغییر فاز دهنده زیر حوضچه‌های بالا، وسط و پایین می‌باشند. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها دما و میزان ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده اندازه‌گیری نشده است در این دو شکل نیز مقادیر تجربی ارائه نشده‌اند. بررسی این دو شکل نشان می‌دهد که برای هر سه روز آزمایش فقط در حوضچه‌های وسط و پایین ماده PCM به دمای ذوب رسیده است و در حوضچه بالا ماده PCM به دمای ذوب نرسیده است.

مانند تابش خورشیدی و دمای محیط قرار دارد و نقش سرعت باد نسبتاً محدودتر است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، دمای محیط در هر سه آزمایش بسیار نزدیک به هم بوده است؛ بنابراین، می‌توان بازده حرارتی سیستم را به‌عنوان شاخصی مناسب برای بررسی تأثیر نرخ گردش هوا در نظر گرفت. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول، افزایش نرخ گردش اجباری هوای مرطوب منجر به کاهش جزئی بازده روزانه آب‌شیرین‌کن شده است. به‌طور مشخص، تغییر شرایط از گردش طبیعی هوا به حداکثر گردش اجباری تنها حدود یک درصد کاهش در بازده عملکرد دستگاه ایجاد کرده است. با این حال، با توجه به مقدار ناچیز این تغییر و نوسانات جزئی شرایط محیطی در روزهای مختلف آزمایش، نمی‌توان با قطعیت این افت بازدهی را به‌تنهایی به افزایش نرخ جریان هوا نسبت داد.

از سوی دیگر، به دلیل دشواری انجام آزمایش‌های تجربی با تغییر مشخصات ماده‌ی تغییر فازدهنده، در ادامه از مدل حرارتی توسعه یافته برای بررسی دقیق‌تر تأثیر فن و خواص ماده‌ی PCM بر عملکرد آب‌شیرین‌کن استفاده خواهد شد. شکل‌ها، نمودارها و جدول‌های این بخش نیز نشان می‌دهند که مدل حرارتی توسعه داده‌شده دارای دقت بالایی بوده و تطابق مناسبی با داده‌های تجربی دارد.

۴-۲- بررسی پارامتری

پس از اطمینان از صحت و دقت این مدل، می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری توانمند برای تحلیل و ارزیابی پارامترهایی استفاده کرد که بررسی آن‌ها در آزمایش‌های تجربی یا امکان‌پذیر نبوده یا به دلایل مختلفی از جمله محدودیت‌های فنی، زمانی یا اقتصادی، انجام‌نشده‌اند. در این بخش، تمرکز بر تحلیل تأثیر پارامترهای گوناگون بر عملکرد آب‌شیرین‌کن قرار گرفته است. برای انجام این تحلیل‌ها نیاز است شرایط محیطی (از جمله تابش خورشیدی و دمای محیط) به‌صورت مشخص و معین در نظر گرفته شوند. به همین منظور، داده‌های تجربی ثبت‌شده مربوط به روز ۱۲ ژوئن به‌عنوان مرجع شرایط آب‌وهوایی انتخاب شده‌اند. همچنین، تمامی ابعاد هندسی آب‌شیرین‌کن، خواص فیزیکی مواد، و سایر پارامترهای عملیاتی (به‌جز مواردی که به‌صورت خاص در هر بخش از تحلیل تغییر داده می‌شوند) برابر با مقادیر مربوط به روز ۱۲ ژوئن در نظر گرفته شده‌اند. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق و منسجم تأثیر هر پارامتر به‌صورت مستقل و در شرایط کنترل‌شده را فراهم می‌سازد. شدت تابش و دمای محیط در روز ۱۲ ژوئن به‌صورت شکل می‌باشد.

جدول ۴: درصد خطای نسبی مطلق در تخمین دمای قسمت‌های

مختلف آب‌شیرین‌کن

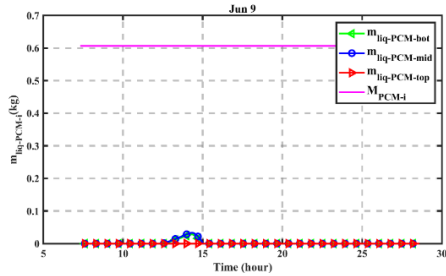
جزء	Jun 9	Jun 10	Jun 11	Jun 12	Jun 13	Jun 14
صفحه جاذب	4/0	4/0	3/5	3/3	3/0	4/0
آب‌شور	4/0	4/0	3/6	3/0	2/5	3/3
شیشه	16/9	18/4	19/0	16/1	13/6	15/4

علاوه بر این حتی در حوضچه‌های پایین و وسط که دما به دمای ذوب رسیده است انرژی رسیده به ماده تغییر فازدهنده زیاد نبوده به‌طوری‌که کسر بسیار کمی از ماده تغییر فازدهنده از جامد به مایع تغییر فاز (ذوب) داده است. جرم ماده تغییر فازدهنده مرتبط با هر حوضچه ۰.۶۰۶۷ کیلوگرم بوده است که در بهترین حالت فقط حدود ۰.۱۲ کیلوگرم از PCM ذوب‌شده است که به نظر می‌رسد میزان ماده تغییر فازدهنده و یا دمای ماده تغییر فازدهنده برای شرایط آزمایش به‌درستی انتخاب نشده است.

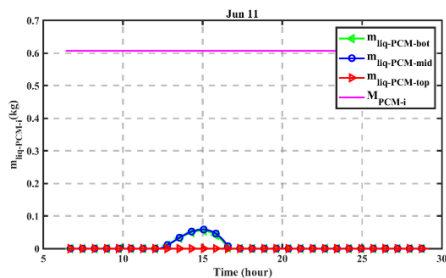
با توجه به اینکه عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی بر اساس میزان آب تولیدی ارزیابی می‌شود، دقت مدل حرارتی نیز با تونلایی آن در پیش‌بینی میزان تولید آب شیرین‌کن سنجیده می‌شود. بنابراین، در ادامه نرخ ساعتی و مقدار تجمعی آب شیرین‌کن تولیدی مدل با نتایج تجربی برای روزهای آزمایش، در جدول مقایسه شده‌اند. مدل حرارتی توسعه‌یافته توانسته است میزان آب شیرین‌کن تولیدی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند و در هر سه روز، روند و مقادیر نتایج آن با نتایج تجربی انطباق خوبی داشته است. اختلاف زمانی حدود یک ساعت و نیم بین نتایج مدل و داده‌های تجربی، ناشی از تأخیر فیزیکی در فرآیند جمع‌آوری آب تقطیرشده در آزمایش است؛ چرا که قطرات ریز آب ابتدا روی سطح تشکیل شده، سپس به مرور زمان این قطرات به هم چسبیده و قطرات بزرگتری را تشکیل می‌دهند که با حرکت روی آن وارد ناودانی و ظرف جمع‌آوری می‌شوند. این تأخیر به عواملی مانند شیب سطح، زاویه ناودانی، اینرسی حرارتی آب تغذیه، ظرفیت گرمایی صفحه جاذب و دمای محیط، کشش سطحی و طراحی سیستم بستگی دارد. برخلاف آن، در مورد دمای اجزای مختلف دستگاه، چنین اختلاف زمانی‌ای بین مدل و داده‌های تجربی وجود ندارد؛ چرا که دما در آزمایش به‌صورت لحظه‌ای توسط ترموکوپل‌ها ثبت می‌شود و تأخیری در فرآیند اندازه‌گیری رخ نمی‌دهد. در جدول، نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های تجربی مربوط به میزان تولید روزانه آب شیرین‌کن برای سه نرخ مختلف جریان هوا در سه روز آزمایش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این جدول شامل اطلاعاتی از جمله وضعیت فن، انرژی خورشیدی دریافتی، بازده تجربی، میزان تولید آب شیرین‌کن به‌صورت تجربی و عددی و همچنین درصد خطای نسبی بین این دو مقدار است. نتایج نشان می‌دهند که مدل عددی توسعه‌یافته با دقت قابل‌قبولی عملکرد آب‌شیرین‌کن را پیش‌بینی کرده است؛ به‌گونه‌ای که حتی با ارزیابی در شش روز مختلف، بیشینه‌ی خطای نسبی پیش‌بینی تولید روزانه آب شیرین‌کن کمتر از ۹ درصد بوده است. شایان توجه است که در صورت ارزیابی فقط در یک روز، این خطا می‌توانست تا حدود ۱ درصد کاهش یابد، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل حرارتی است.

از آنجا که شرایط آب‌وهوایی در سه آزمایش دقیقاً یکسان نبوده است، مقایسه‌ی میزان تولید آب شیرین‌کن نمی‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی تأثیر گردش هوا بر عملکرد آب‌شیرین‌کن باشد. به‌طور کلی، عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بیشتر تحت تأثیر عوامل محیطی

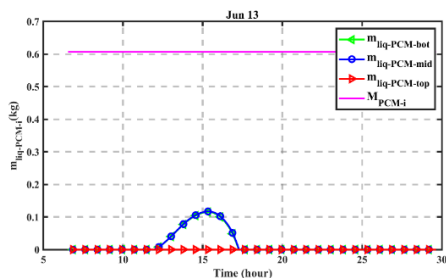
نرسیده و ممکن است اصلاً فعال نشود. انتخاب مناسب این دما موجب بهبود تولید آب شیرین، افزایش پایداری عملکرد و بهره‌وری سیستم می‌شود. بنابراین، تحلیل دقیق حرارتی و توجه به شرایط اقلیمی پیش از انتخاب PCM ضروری است.



الف

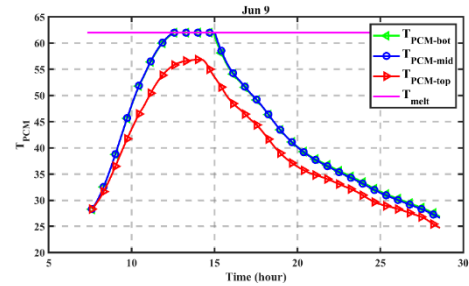


ب

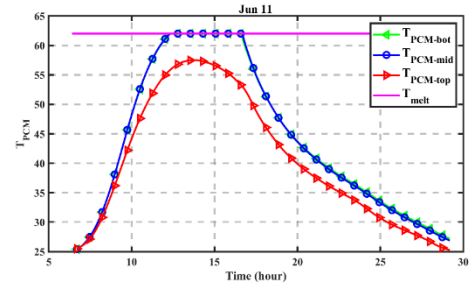


ج

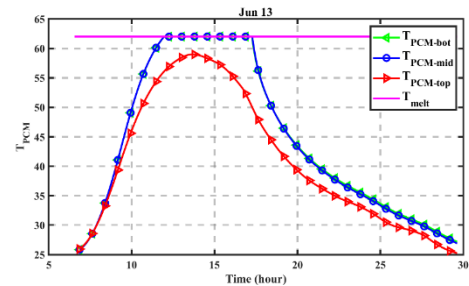
الف



ب



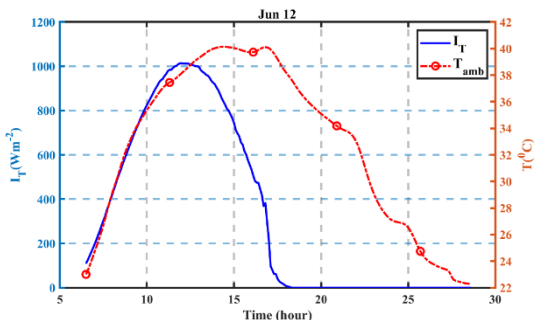
ج



شکل ۱۰: تغییرات دمای ماده تغییر فاز دهنده قرار گرفته در زیر حوضچه‌های پایین، وسط و بالا در روزهای آزمایش در ماه ژوئن

شکل ۱۱: تغییرات میزان پارافین ذوب‌شده (ماده تغییر فاز دهنده) قرار گرفته در زیر حوضچه‌های پایین، وسط و بالا به‌دست آمده توسط

مدل حرارتی در روزهای آزمایش



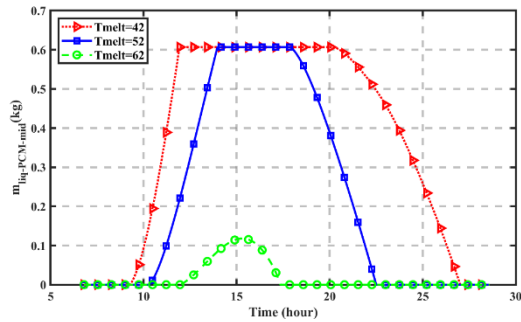
شکل ۱۲: دمای هوای محیط و شدت تابش خورشید در روز ۱۲ ژوئن برای ارزیابی تأثیر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده (PCM) بر عملکرد آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته، از مجموعه‌ای از مواد فرضی با خواص ترموفیزیکی مشابه پارافین اما با دماهای ذوب متفاوت استفاده شده است. دماهای ذوب انتخابی در بازه ۳۷ تا ۶۲ درجه سانتی‌گراد و با گام‌های ۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده‌اند. هدف این تحلیل،

جدول ۵: دقت مدل حرارتی (مدل‌سازی) در تخمین میزان آب شیرین تولیدی آب‌شیرین‌کن در روزهای آزمایش

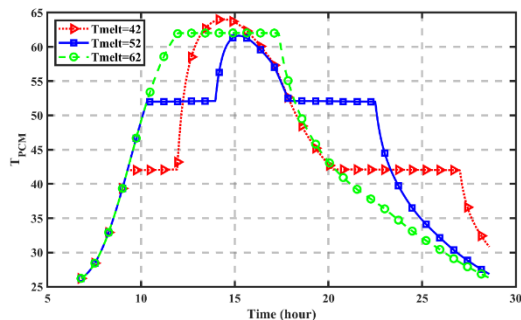
روز آزمایش	وضعیت فن	E_{Sim}^{day} (Mj)	η (%)	تجربی	مدل س‌ازی	درصد اختل
9 ژوئن	off	17/95	37/4	2742	2672	-2/6
10 ژوئن		18/86	37/1	2858	2721	-4/8
11 ژوئن	0.5RPM _{max}	20/87	34/5	2938	3021	2/8
12 ژوئن		20/72	35/7	3018	3049	-1/0
13 ژوئن	0.5RPM _{max}	20/88	33/7	2875	3045	5/9
14 ژوئن		20/56	33/1	2775	3003	8/2

۴-۲-۱- اثر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده

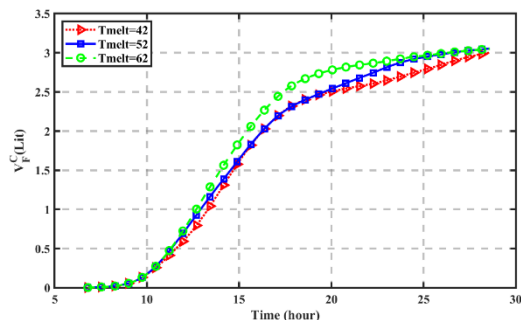
دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده (PCM) یکی از عوامل کلیدی در انتخاب آن برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است، چراکه کارایی آن به تطابق با محدوده دمایی عملکرد دستگاه بستگی دارد. اگر دمای ذوب خیلی پایین باشد، PCM زودتر از موعد ذوب شده و در ساعات اوج تابش ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثری نخواهد داشت. از سوی دیگر، اگر دمای ذوب بیش از حد بالا باشد، ممکن است سیستم هرگز به آن دما



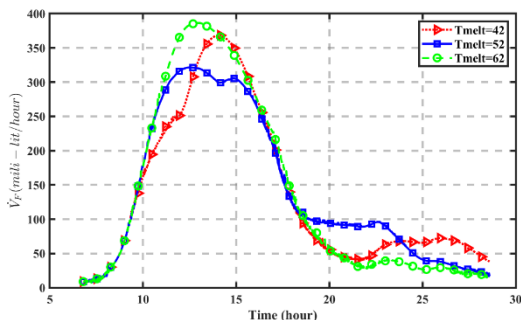
شکل ۱۳: اثر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر منحنی جرم ذوب شده ماده تغییرفازدهنده در محفظه زیر حوضچه وسط



شکل ۱۴: اثر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر منحنی دمای ماده تغییرفازدهنده در محفظه زیر حوضچه وسط



شکل ۱۵: اثر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر تغییرات میزان جمعیتی آب شیرین تولیدی در طول آزمایش



شکل ۱۶: اثر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر نرخ آب شیرین تولیدی ساعتی در طول آزمایش

بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای ذوب PCM از مقدار مرجع (۳۷ درجه سانتی‌گراد)، عملکرد آب‌شیرین‌کن در ابتدا بهبود می‌یابد؛ به طوری که تا دمای ۵۷ درجه سانتی‌گراد، میزان آب تولیدی افزایش نشان می‌دهد. با این حال، افزایش

بررسی تأثیر دمای ذوب PCM بر میزان تولید آب شیرین و دمای قسمت‌های مختلف آب شیرین‌کن می‌باشد. به این منظور، با استفاده از مدل حرارتی، مقدار کل آب تولیدشده برای هر یک از دماهای ذوب مورد بررسی، محاسبه شده و نتایج در جدول ارائه گردیده است. لازم به ذکر است به جزء دمای ذوب بقیه شرایط در مدل حرارتی مشابه شرایط روز ۱۲ ژوئن می‌باشند. در این جدول، دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به عنوان مرجع انتخاب شده و درصد تغییرات عملکرد نسبت به این مقدار نیز گزارش شده است.

بررسی اثر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر منحنی تغییرات میزان ماده تغییرفازدهنده ذوب‌شده در طول آزمایش برای ماده تغییرفازدهنده در شکل ارائه شده است. به منظور مختصر شدن در این دو شکل و آنچه در ادامه می‌آید فقط سه دمای ذوب ۴۲، ۵۲ و ۶۲ سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته است و این شکل‌ها مربوط به ماده تغییرفازدهنده زیر حوضچه وسط می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای ذوب میزان و مدت زمانی که ماده تغییرفازدهنده ذوب‌شده و انرژی را در خود ذخیره می‌نماید کاهش می‌یابد به نحوی که در دمای ۶۲ درجه سانتی‌گراد حتی در حوضچه وسط هم فقط ۰.۱ از حدود ۰.۶ کیلوگرم ذوب می‌شود و مابقی به صورت جامد باقی می‌ماند. دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بر منحنی دمای ماده تغییرفازدهنده نیز تأثیرگذار است و بیشینه دما و زمان رسیدن به بیشینه دما را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل و شکل تأثیر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده به ترتیب بر میزان جمعیتی آب شیرین تولیدی، نرخ ساعتی آب شیرین تولیدی و دمای صفحه جاذب نشان داده شده است. بررسی شکل نشان می‌دهد که وقتی دمای ذوب پایین باشد به دلیل رسیدن دمای ماده تغییرفازدهنده به دمای ذوب در ساعات اولیه آزمایش، میزان آب شیرین تولیدی نسبت به دماهای ذوب بالاتر، با نرخ کمتری افزایش می‌یابد. با ذوب شدن تمام ماده PCM نرخ تولید آب شیرین دوباره افزایش می‌یابد. روند نرخ تولید آب شیرین در بعد از ظهر و شب بسته به دمای ذوب متفاوت خواهد بود در دمای ذوب متوسط (۵۲ درجه سانتی‌گراد) بازیافت انرژی از ماده تغییرفازدهنده از بعدازظهر (از شروع انجماد) شروع شده و تا حدود ساعت ۲۳ ادامه می‌یابد و در این محدوده نرخ تولید آب شیرین تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بعد از جامد شدن تمامی PCM نرخ تولید آب شیرین کاهش می‌یابد. بررسی دمای صفحه جاذب در دماهای مختلف ذوب ماده تغییرفازدهنده نشان می‌دهد که هر چند به دلیل مقاومت حرارتی بین صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده دمای این صفحه در هنگام ذوب و یا انجماد ماده تغییرفازدهنده ثابت نیست اما با نرخ کمتری نسبت به شرایط پیش از ذوب ماده تغییرفازدهنده تغییر می‌نماید.

حالت، بدون ماده تغییر فاز دهنده و جرم‌های ۳.۱ و ۱۲.۱ کیلوگرم ماده تغییر فاز دهنده ارائه شده و خواهند شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده از ۳.۱ به ۱۲.۱ باعث شده است که اولاً همه ماده تغییر فاز دهنده ذوب نشود و عملاً ذخیره انرژی به صورت نهان را نداشته باشد. علاوه بر این با توجه به اینکه همه ماده تغییر فاز دهنده ذوب نشده است بیشینه دمای ماده تغییر فاز دهنده همان دمای ذوب خواهد بود.

اثر جرم ماده تغییر فاز دهنده بر منحنی تجمعی تولید آب شیرین، نرخ تولید ساعتی آب شیرین، و دمای صفحه جاذب به ترتیب در شکل و شکل و

شکل ارائه شده است. تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش جرم PCM، مقدار تجمعی و نرخ ساعتی تولید آب شیرین در حوالی ظهر کاهش یافته، اما در ساعات عصر و شب افزایش می‌یابد. این الگو در مورد دمای صفحه جاذب نیز صادق است و دمای این صفحه با افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده در حوالی ظهر کاهش می‌یابد. در جدول، تأثیر جرم PCM بر کل میزان آب شیرین تولیدی روزانه توسط آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته (مجهز به فن و PCM) نشان داده شده است. طبق این جدول، افزایش اولیه جرم PCM از صفر، باعث افزایش تولید آب شیرین می‌شود، اما پس از رسیدن به یک مقدار مشخص، افزایش بیشتر جرم PCM نه تنها تأثیری مثبت ندارد، بلکه منجر به کاهش تولید آب شیرین می‌گردد.

نکته مهمی که از بررسی نمودارها و جدول می‌توان برداشت کرد این است که هرچند جرم PCM بر میزان تولید آب شیرین اثرگذار است، اما این تأثیر بسیار جزئی و در حدود ۱ درصد است. با توجه به پیچیدگی‌های فنی و هزینه‌های افزوده مربوط به استفاده از PCM، استفاده از این ماده در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته از نظر اقتصادی و عملی توجیه‌پذیر نیست. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری PCM در طراحی این نوع آب‌شیرین‌کن توصیه نمی‌شود.

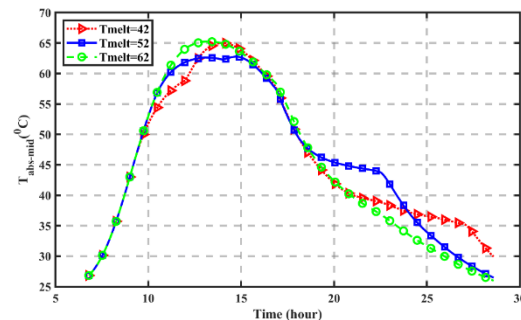
جدول ۷: بررسی اثر میزان ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد

آب‌شیرین‌کن بهبودیافته با فن و ماده تغییر فاز دهنده در دمای ذوب

$$T_{melt} = 55^{\circ}\text{C}$$

جرم ماده تغییر فاز دهنده	وضعیت فن	مدل‌سازی	درصد اختلاف (%)
$m_{PCM} = 0.0\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3056	0 (مرجع)
$m_{PCM} = 0.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3080	0/8
$m_{PCM} = 1.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3082	0/9
$m_{PCM} = 2.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3084	0/9
$m_{PCM} = 3.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3085	1/0
$m_{PCM} = 6.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3072	0/5
$m_{PCM} = 9.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3061	0/2
$m_{PCM} = 12.1\text{kg}$	$0.5RPM_{max}$	3054	- 0/1

بیشتر دمای ذوب به مقادیری بالاتر از ۵۷ درجه، موجب افت عملکرد سیستم می‌شود. در میان دماهای مورد بررسی، دمای ۵۷ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان بهترین دما شناسایی شده است که در این حالت، بیشترین تولید آب شیرین حاصل شده و نسبت به حالت مرجع، حدود ۵.۷ درصد افزایش در تولید ثبت شده است.



شکل ۱۷: اثر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر دمای صفحه جاذب در

حوضچه وسط در طول آزمایش

جدول ۶: بررسی تأثیر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر میزان آب شیرین تولیدی

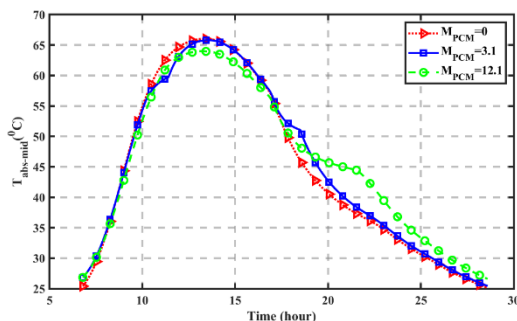
دمای ذوب	وضعیت فن	جرم PCM	مدل‌سازی	درصد اختلاف (%)
$T_{melt} = 37^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	2891	0 (مرجع)
$T_{melt} = 42^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	3003	3/9
$T_{melt} = 47^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	3043	5/3
$T_{melt} = 52^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	3053	5/6
$T_{melt} = 57^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	3057	5/7
$T_{melt} = 62^{\circ}\text{C}$	$0.5RPM_{max}$	9.1kg	3049	5/5

۲-۲-۴- اثر جرم ماده تغییر فاز دهنده

مقدار جرم ماده تغییر فاز دهنده (PCM) می‌تواند بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تأثیرگذار باشد. افزایش یا کاهش جرم PCM می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان ذخیره حرارتی و در نهایت بر میزان تولید آب شیرین در طول شبانه‌روز اثر بگذارد. در این بخش، به تحلیل و ارزیابی اثر جرم PCM بر عملکرد کلی آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته همراه با فن و ماده تغییر فاز دهنده می‌پردازیم. هدف از این تحلیل، تعیین مقدار جرم PCM است که بتواند با ذخیره انرژی در طول روز و آزادسازی تدریجی آن در بعدازظهر و هنگام شب، عملکرد پیوسته‌تر و مؤثرتری را برای آب‌شیرین‌کن ایجاد نماید. با توجه به تحلیل انجام شده در قبل، دمای ذوب در این تحلیل ۵۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است. منحنی تغییرات میزان ماده تغییر فاز دهنده ذوب شده و دمای ماده تغییر فاز دهنده در طول آزمایش در شکل و شکل نشان داده شده است. به‌منظور مختصر سازی، در این دو شکل و شکل‌هایی که در ادامه می‌آیند نتایج فقط برای سه

۴-۲-۳- اثر دبی جرمی هوای مرطوب در گردش (اثر گردش اجباری)

نقش اصلی گردش هوا در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبود یافته، کمک به انتقال مؤثر بخار آب از ناحیه تبخیر به ناحیه تقطیر و یا میعان (کندانسور و پوشش شیشه ای) است. گردش هوا موجب خروج هوای مرطوب از سطح آب‌شور و جایگزینی آن با هوای خشک می‌شود. این فرآیند برای حفظ اختلاف فشار جزئی بخار آب میان سطح آب و هوا حیاتی است، زیرا این اختلاف، نیروی محرکه‌ای برای تبخیر و در نتیجه تولید آب شیرین محسوب می‌شود. در این میان، کندانسور و پوشش شیشه‌ای به‌عنوان چاه‌های جرم و حرارت عمل کرده و بخار آب موجود را جذب می‌کنند. هوای در گردش، بخار آب را از سطح تبخیر به سمت این سطوح هدایت کرده تا در آنجا میعان یابد و به آب شیرین تبدیل شود.

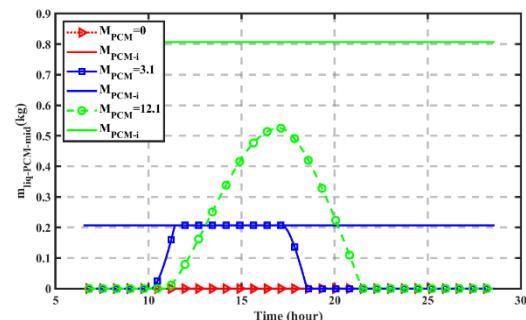


شکل ۲۲: اثر مقدار جرم ماده تغییر فاز دهنده بر منحنی دمای صفحه جاذب در حوضچه وسط در طول آزمایش

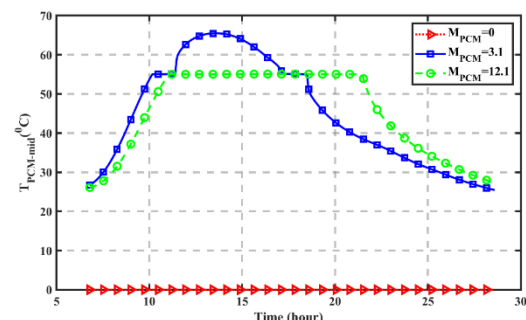
نرخ جریان هوای در گردش، به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی عملیاتی، تأثیر بسزایی بر عملکرد و هزینه‌ی کلی سیستم دارد. این نرخ، دو اثر متضاد بر عملکرد سیستم دارد: اولین اثر افزایش نرخ تبخیر است زیرا که با افزایش دبی هوا، غلظت بخار آب در نزدیکی سطح تبخیر کاهش یافته و اختلاف غلظت میان سطح و هوای اطراف افزایش می‌یابد. این اختلاف بیشتر، موجب افزایش نرخ تبخیر می‌شود. با توجه به تأمین شدن انرژی نهان تبخیر از محتوای حرارتی آب‌شور گرم شده، دومین اثر گردش هوا کاهش دمای آب و در نتیجه کاهش نرخ تبخیر است. دومین اثر گردش هوا کاهش دمای آب و در نتیجه کاهش نرخ تبخیر است. در این بخش، هدف اصلی تحلیل تأثیر این دو پدیده متضاد و شناسایی عامل غالب در عملکرد سیستم است. به این منظور، مدل حرارتی توسعه‌یافته برای مقادیر مختلفی از دبی هوای در گردش اجرا شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، شرایط آب‌وهوایی و پارامترهای طراحی ثابت بوده و مشابه داده‌های ثبت‌شده در روز ۱۲ ژوئن در نظر گرفته شده‌اند. این تحلیل کمک می‌کند تا تأثیر واقعی گردش هوا بر بازدهی آب‌شیرین‌کن بهتر درک شود و در نتیجه تصمیم‌گیری در خصوص استفاده از فن یا تکیه بر گردش طبیعی هوا بهینه‌سازی گردد.

به دین منظور مدل حرارتی توسعه داده شده برای دبی‌های مختلف هوای در گردش اجرا شده و نتایج به دست آمده است. شرایط آب و

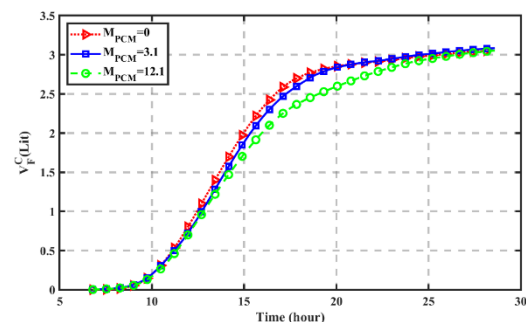
$$m_{PCM} = 15.1 \text{ kg} \quad 0.5 \text{ RPM}_{\max} \quad 3047 \quad -0/3$$



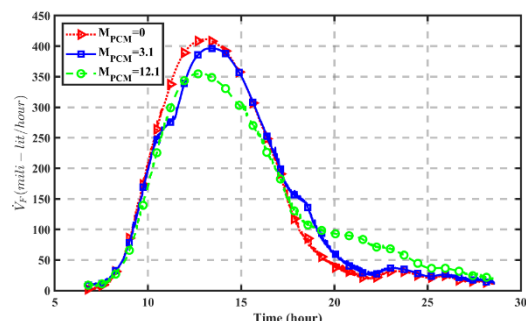
شکل ۱۸: اثر جرم ماده تغییر فاز دهنده بر منحنی جرم ذوب‌شده ماده تغییر فاز دهنده در محفظه زیر حوضچه وسط در طول آزمایش



شکل ۱۹: اثر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر منحنی دمای ماده تغییر فاز دهنده در محفظه زیر حوضچه وسط

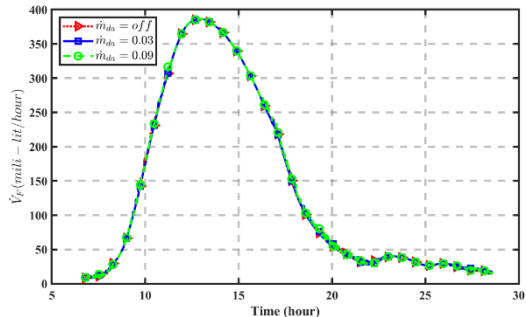


شکل ۲۰: اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر تغییرات میزان جمعیتی آب شیرین تولیدی



شکل ۲۱: اثر مقدار جرم ماده تغییر فاز دهنده بر نرخ آب شیرین تولیدی ساعتی

کلی به همه انواع آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی تعمیم داده شود. چرا که طراحی، ساختار، شرایط اقلیمی و نحوه عملکرد هر سامانه ممکن است متفاوت بوده و تأثیر فن بر عملکرد آن نیز متناسب با این عوامل تغییر کند. از این رو، ارزیابی استفاده از فن باید متناسب با طراحی خاص هر سامانه و شرایط عملکردی آن صورت گیرد.



شکل ۲۴: اثر مقدار جرم ماده تغییر فاز دهنده بر نرخ آب شیرین تولیدی ساعتی در طول آزمایش

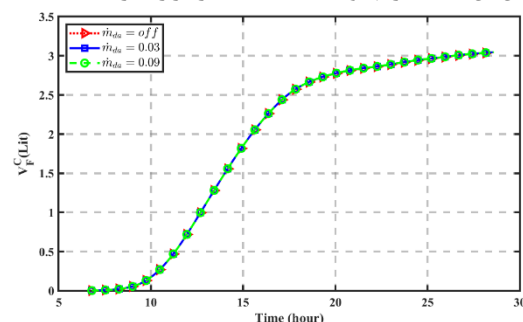
جدول ۸: بررسی اثر دبی جرمی هوای مرطوب در چرخش بر میزان آب شیرین تولیدی آب‌شیرین‌کن

دبی جرمی هوای مرطوب (وضعیت فن)	جرم PCM	مدل‌سازی	درصد اختلاف (%)
$\dot{m}_{da}^{fm} = off$	9.1kg	3043	0(مرجع)
$\dot{m}_{da}^{fm} = 0.01kg / s$	9.1kg	3043	0/0
$\dot{m}_{da}^{fm} = 0.03kg / s$	9.1kg	3046	0/1
$\dot{m}_{da}^{fm} = 0.06kg / s$	9.1kg	3053	0/3
$\dot{m}_{da}^{fm} = 0.09kg / s$	9.1kg	3059	0/5
$\dot{m}_{da}^{fm} = 0.12kg / s$	9.1kg	3070	0/9

۵. نتیجه

در این پژوهش، یک مدل حرارتی دقیق و جامع برای پیش‌بینی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته مجهز به فن و ماده تغییر فاز دهنده (PCM) توسعه داده شد. مدل ارائه‌شده به گونه‌ای طراحی شده است که امکان شبیه‌سازی مجزای اثر فن و PCM را دارا بوده و می‌تواند در شرایط گوناگون عملیاتی عملکرد سیستم را به‌طور دقیق تحلیل نماید. اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی شش روز متوالی نشان داد که مدل توسعه‌یافته قادر است دمای اجزای مختلف و همچنین میزان تولید آب شیرین را با دقت بسیار بالا پیش‌بینی کند (خطای کمتر از ۹ درصد در برآورد آب تولیدی روزانه). با بهره‌گیری از مدل توسعه‌یافته، اثر سه پارامتر کلیدی شامل دمای ذوب PCM، جرم PCM و نرخ گردش هوای مرطوب بر عملکرد آب‌شیرین‌کن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که انتخاب صحیح دمای ذوب PCM می‌تواند تا ۵ درصد عملکرد آب‌شیرین‌کن را بهبود بخشد، اما تغییر جرم PCM تأثیر قابل توجهی نداشته و استفاده از آن برای این نوع

هوایی و دیگر شرایط و پارامترهای طراحی مشابه مقادیر آزمایش روز ۱۲ ژوئن در نظر گرفته شده‌اند. میزان آب شیرین تولیدی کل در نرخ‌های مختلف دبی هوای در گردش، که توسط مدل توسعه داده شده به‌دست آمده‌اند، در جدول ارائه شده است. در این جدول حالت فن خاموش و یا گردش طبیعی هوا و دبی‌های ۰.۰۱، ۰.۰۳، ۰.۰۶، ۰.۰۹ و ۰.۱۲ کیلوگرم بر ثانیه ارائه شده‌اند. در شکل و شکل اثر نرخ گردش هوا بر میزان تجمعی آب شیرین تولیدی و نرخ ساعتی آب شیرین تولیدی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود تغییر نرخ گردش هوا تأثیر قابل مشاهده‌ای بر میزان تجمعی آب شیرین تولیدی و نرخ ساعتی آب شیرین تولیدی ندارد. این رفتار بر دمای قسمت‌های مختلف و میزان ماده تغییر فاز دهنده ذوب‌شده نیز قابل مشاهده است که به دلیل پرهیز از طولانی شدن متن، این نمودارهای در اینجا ذکر نشده‌اند. همان‌طور که از جدول و نمودارهای ارائه‌شده مشخص است، در محدوده مقادیر مورد بررسی، نرخ جریان هوای در گردش تأثیر بسیار ناچیزی بر عملکرد آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته دارد که می‌توان نتیجه گرفت تأثیر مثبت استفاده از فن برای افزایش نرخ جریان هوا و افزایش نرخ تبخیر با اثر منفی آن بر کاهش دمای آب‌شور خنثی می‌شود. این یافته قابل توجه به این نتیجه مهم منجر می‌شود که با توجه به عدم تأثیر چشمگیر افزایش یا کاهش دبی هوا بر میزان تولید آب شیرین، می‌توان از به‌کارگیری فن صرف‌نظر کرده و به‌جای آن از گردش طبیعی هوا بهره گرفت بدون اینکه عملکرد آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته تحت تأثیر قرار گیرد.



شکل ۲۳: اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر تغییرات میزان تجمعی آب شیرین تولیدی در طول آزمایش

شایان‌ذکر است که به‌کارگیری فن در آب‌شیرین‌کن خورشیدی، علاوه بر تحمیل هزینه‌های اولیه برای خرید و نصب، مستلزم مصرف مداوم انرژی در طول بهره‌برداری و همچنین نیازمند انجام دوره‌ای عملیات نگهداری و تعمیرات خواهد بود. افزوده شدن فن به سامانه، ساختار دستگاه را پیچیده‌تر کرده و در نتیجه فرآیند طراحی، ساخت و بهره‌برداری آن را دشوارتر می‌سازد. این پیچیدگی فنی می‌تواند به کاهش قابلیت اطمینان سامانه و افزایش هزینه‌های کلی منجر شود. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها، استفاده از فن در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبودیافته مورد مطالعه، توصیه نمی‌شود. با این حال، لازم به تأکید است که نتیجه‌گیری مذکور تنها به طراحی و ویژگی‌های خاص این سامانه مربوط است و نباید به‌صورت

- [10] E. A. Abdel-Aziz, T. M. Mansour, M. M. K. Dawood, T. M. Ismail, and 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, 2023/05/01 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26761-4.
- [11] 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, p. 103822, 2024/01/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103822>.
- [12] H. E. S. Fath, S. M. El-Sherbiny, and A. Ghazy, "Transient analysis of a new humidification-dehumidification solar still," *Desalination*, vol. 155, no. 2, pp. 187-203, 2003/06/15/ 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00296-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00296-0).
- [13] H. E. S. Fath, S. Elsherbiny, and A. Ghazy, "A naturally circulated humidifying/dehumidifying solar still with a built-in passive condenser," *Desalination*, vol. 169, no. 2, pp. 129-149, 2004/10/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.014>.
- [14] Z. M. Omara, A. S. Abdullah, and T. Dakrory, "Improving the productivity of solar still by using water fan and wind turbine," *Solar Energy*, vol. 147, pp. 181-188, 2017/05/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.041>.
- [15] A. Kandeal *et al.*, "Thermo-economic performance enhancement of a solar desalination unit using external condenser, nanofluid, and ultrasonic foggers," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102348, 2022.
- [16] A. E. Kabeel, Z. M. Omara, and F. A. Essa, "Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 493-498, 2014/02/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.013>.
- [17] A. A. Hussein and N. Abid Jassim, "Experimental investigation of solar still with separate condenser coupled," *Materials Today: Proceedings*, vol. 60, pp. 1611-1622, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.143>.
- [18] A. W. Kandeal *et al.*, "Thermo-economic performance enhancement of a solar desalination unit using external condenser, nanofluid, and ultrasonic foggers," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102348, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102348>.
- [19] 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), doi: 10.22034/jmeut.2022.50389.3063.
- [20] H. Amiri, "Enhancing the stepped solar still performance using a built-in passive condenser ", *Solar Energy*, vol. 248, pp. 88-102, 2022.
- [21] H. Amiri, "Development and application of a thermal model for the improved stepped solar still with a built-in passive condenser," *Solar Energy*, vol. 270, p. 112378, 2024/03/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112378>.
- آب شیرین کن توصیه نمی‌شود. از سوی دیگر، بررسی اثر فن و گردش اجباری هوا نشان داد که افزایش نرخ دبی هوای مرطوب تأثیر محسوس‌تری بر افزایش تولید آب شیرین ندارد. بنابراین، با توجه به هزینه‌های اولیه، انرژی و نگهداری فن، استفاده از آن در این سامانه پیشنهاد نمی‌شود.
- ### سیاسگزاری
- این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۰۲/۳۶۹۹ 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.
- ### مراجع
- [1] V. Velmurugan and K. Srihar, "Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1294-1304, 2011/02/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.012>.
- [2] A. E. Kabeel, Z. M. Omara, F. A. Essa, and A. S. Abdullah, "Solar still with condenser – A detailed review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 839-857, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.020>.
- [3] A. Kabeel, Z. Omara, and M. Younes, "Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 46, pp. 178-188, 2015.
- [4] 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.
- [5] M. Al-harashsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, and Z. Alzghoul, "Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM," *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, pp. 1030-1040, 2018.
- [6] A. A. M. Omara, A. A. A. Abuelnuor, H. A. Mohammed, and 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, doi: 10.1007/s10973-019-08645-3.
- [7] S. S. Adibi Toosi, H. R. Goshayeshi, I. Zahmatkesh, and 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, doi: 10.22034/jmeut.2022.53281.3163.
- [8] M. R. Assari, H. Basirat Tabrizi, A. Kavosinejad, and 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.
- [9] S. M. Shalaby, E. El-Bialy, and A. A. El-Sebaai, "An experimental investigation of a v-corrugated absorber single-basin solar still using PCM," *Desalination*, vol. 398, pp. 247-255, 2016/11/15/ 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.07.042.

زیر نویس ها

³ Root Mean Square Error

¹ Active

² Passive