



## طراحی، ساخت و مدل‌سازی یک آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی جدید و بررسی عملکرد آن

حسین امیری<sup>۱\*</sup>، مرضیه لطفی<sup>۲</sup>، محمد امینی<sup>۳</sup> و بهزاد جعفری‌بگلو<sup>۲</sup><sup>۱</sup> استادیار، پژوهشگاه انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

## چکیده

در این تحقیق یک آب‌شیرین‌کن جدید با عنوان آب شیرین‌کن حوضچه خورشیدی با متمرکز کننده سهموی خطی طراحی و ساخته شده است. این آب‌شیرین‌کن از یک کلکتور سهموی خطی که تابش را به زیر (کف) حوضچه خورشیدی متمرکز می‌کند و یک حوضچه خورشیدی که در خط تمرکز کلکتور قرار گرفته، تشکیل شده است. عملکرد آب‌شیرین‌کن در شرایط واقعی مورد بررسی قرار گرفته و اثر اضافه کردن سیم‌های استیل (اسفنج‌های سیمی) به آب درون حوضچه و استفاده از سایبان روی فین‌های کندانسور بر عملکرد دستگاه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از سیم‌های استیل و سایبان، باعث بهبود عملکرد دستگاه به ترتیب به میزان ۱۷/۷ درصد و ۶/۳ درصد می‌شود. به‌منظور تخمین کارایی آب‌شیرین‌کن در شرایط مختلف، یک مدل حرارتی برای آب‌شیرین‌کن توسعه داده شده و معادلات حاکم در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و حل شده‌اند. با استفاده از این مدل تغییرات دمای آب، دمای صفحه جاذب و میزان آب تولیدی در طول روز تخمین زده شده و با داده‌های تجربی آب‌شیرین‌کن مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که همخوانی خوبی بین نتایج تجربی و نتایج مدل حرارتی وجود دارد (متوسط خطا در تخمین همه متغیرها کمتر از ۶٪). نهایتاً با استفاده از این مدل رفتار دستگاه در روزهای منتخب فصول مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آب‌شیرین‌کن؛ انرژی خورشیدی؛ حوضچه خورشیدی؛ مدل حرارتی

## Design, Fabrication and Modeling of a New Solar Still Desalination System and Evaluation of Its Performance

H. Amiri<sup>1,\*</sup>, M. Lotfi<sup>2</sup>, M. Aminy<sup>3</sup>, B. Jafarbeglo<sup>2</sup><sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advance Technology, Kerman, Iran.<sup>2</sup> M.Sc student, Graduate University of advance technology, Kerman, Iran.<sup>3</sup> Assistant Professor, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

## Abstract

In this study, a new solar water desalination system is designed and fabricated. In this system, solar energy intensity has been concentrated by means of parabolic trough collector, which reflects the sunrays to its focal line, where the still is located. Performance of the desalination system was studied in real conditions. The effect of adding steel sponge to the water inside the still and the use of a canopy on the condenser fins has been studied. Results show that the performance of the desalination system increase by 17.7% and 6.3% by using steel sponge and canopy, respectively. In order to investigate the effect of various factors on the performance of the present desalination system, a thermal model is developed based on the conservation of energy. The governing equations are implemented and solved numerically in MATLAB software. Then results of this modeling, including water temperature, adsorbent plate temperature and rate of fresh water production were compared with empirical data and a good agreement between them was observed. Average relative error between experimental and thermal model results for all variables was less than 6 percent. Finally, the model is used to study the behavior of the machine in different seasons.

Keywords: Desalination; Solar Energy; Solar Still; Thermal Model.

## ۱- مقدمه

آب نقش مهمی در تمام فعالیت‌های روزمره بشر ایفا می‌کند و مصرف آن به دلیل افزایش استانداردهای زندگی و افزایش جمعیت در حال افزایش روزبه‌روز است. در سال‌های اخیر، استفاده از منابع آبی به حدی افزایش یافته که کمبود آن به‌عنوان یک بحران مطرح می‌شود. بحران آب در بسیاری از کشورهای جهان، از جمله کشورهای واقع در کمربند خشک زمین مثل ایران، روزبه‌روز ابعاد پیچیده‌تری به خود می‌گیرد. آلودگی منابع آبی در دسترس مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها به‌واسطه زباله‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری، از دیگر مشکلات حال حاضر جوامع بشری است. با توجه به وجود منابع بزرگ آب‌شور مانند اقیانوس‌ها و دریاها و وجود منابع محلی آب‌شور و یا آلوده در مناطق مختلف، صنعت شیرین‌سازی آب یک راه‌حل منطقی و مطمئن برای حل مشکل کمبود آب شرب به شمار می‌آید.

برای شیرین‌سازی آب‌ها، نیاز به صرف انرژی داریم. بررسی‌ها نشان داده است که چنانچه بخواهیم از سوخت‌های فسیلی این انرژی را تأمین نماییم، برای تولید هر ۱۰۰۰ لیتر (یک مترمکعب) آب شیرین، به‌طور تقریبی باید معادل ۲۷ لیتر نفت خام مصرف شود [۱]. با توجه به محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی ایجاد شده ناشی از مصرف آن‌ها، در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در زمینه‌های مختلف، مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به منابع فراوان آب‌شور در شمال و جنوب ایران و منابع محلی آب‌شور و یا آلوده در بقیه مناطق و با توجه به فراوانی و پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در اکثر مناطق ایران [۲]، شیرین‌سازی آب‌های شور به‌وسیله انرژی خورشید، یک گزینه بسیار مناسب برای رفع مشکلات کمبود آب شیرین در کشور است.

به گزارش انجمن بین‌المللی آب‌شیرین‌کن‌ها در سال ۲۰۱۵، ۸۶/۸ میلیون مترمکعب آب شیرین در روز تولید شده است که نسبت به سال ۲۰۱۴، یک رشد ۵٪ را نشان می‌دهد [۳]. هدف یک سیستم آب‌شیرین‌کن، تصفیه آب‌شور و تولید آب با TDS در حد مجاز ۵۰۰ ppm و یا کمتر است [۴].

فناوری‌های مختلفی برای شیرین‌سازی آب‌های شور وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی، روش‌های با

تغییر فاز (حرارتی) و روش‌های بدون تغییر فاز (غشائی) تقسیم‌بندی کرد. از انرژی خورشیدی می‌توان به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم در این فناوری‌ها استفاده کرد. در روش‌های غیرمستقیم، انرژی خورشیدی در یک کلکتور جمع‌آوری شده و توسط یک سیال عامل به آب‌شیرین‌کن منتقل می‌شود [۵، ۶].

آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی، از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین فناوری‌های شیرین‌سازی آب می‌باشند که به‌سادگی قابل ساخت هستند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمی دارند. در این آب‌شیرین‌کن، آب‌شور درون حوضچه ریخته می‌شود و توسط تابش خورشیدی که از پوشش شفاف عبور می‌کند، گرم و به‌صورت سطحی تبخیر می‌شود. آب تبخیر شده در تماس با پوشش شفاف (شیب‌دار) که سردتر از بخار است (به دلیل اینکه در معرض هوای بیرون قرار دارد)، تقطیر و جمع‌آوری می‌شود. این آب‌شیرین‌کن‌ها برای تولید آب شیرین در مقیاس کم، خصوصاً برای تولید پراکنده و برای کاربردهای قابل‌حمل، بسیار مناسب هستند. مشکل بزرگ این آب‌شیرین‌کن‌ها، نرخ پایین تولید آب شیرین توسط آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های شیرین‌سازی آب است.

شدت تابش خورشید، سرعت باد، دمای محیط، دمای آب، دمای پوشش شفاف (غالباً شیشه)، مساحت سطح آزاد آب، مساحت سطح جاذب، دمای آب ورودی، ضرایب انتقال حرارت، زاویه پوشش شفاف (غالباً شیشه) و عمق آب، مهم‌ترین عواملی هستند که بر بهره‌وری آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای (نرخ تولید آب شیرین) تأثیر می‌گذارند. دمای محیط، سرعت طبیعی باد و شدت تابش خورشید، عواملی محلی و جوی هستند که قابل‌کنترل نیستند، ولی بقیه پارامترها قابل‌کنترل بوده و محققان با ارائه روش‌های جدید برای تغییر این پارامترها، سعی در بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای دارند. در ادامه به‌طور مختصر این پارامترها معرفی و به مطالعات مرتبط اشاره خواهد شد.

پیشرفت‌های صورت گرفته روی آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی تا سال ۲۰۰۸، توسط مورگاول و همکاران [۷] مرور و جمع‌بندی شده است. سامپاتاکومار و همکاران [۴]، مطالعات مربوط به آب‌شیرین‌کن‌های فعال خورشیدی را مرور کرده‌اند. رجاسین‌واسان و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۳، مطالعات پیشین روی آب‌شیرین‌کن‌های

حوضچه، عملکرد آب شیرین کن را کنترل می‌کند؛ همچنین سرعت باد تأثیر زیادی بر میزان آب تولیدی دارد.

استفاده از فتیله به دلیل افزایش سطح آزاد آب و کاهش ضخامت آب و افزایش دمای آب، به صورت محلی باعث افزایش نرخ تولید آب شیرین توسط آب شیرین کن می‌شود [۱۹]. شوکلا و ثریان [۲۰]، به مطالعه عددی و آزمایشگاهی آب شیرین کن حوضچه خورشیدی چند فتیله‌ای دو شیب و تک شیب در شرایط آب و هوایی دهلی پرداختند.

یکی دیگر از روش‌های افزایش نرخ تولید آب شیرین، افزایش نرخ انتقال حرارت بین سطح جاذب و آب شور درون حوضچه است، به این منظور استفاده از فین‌ها پیشنهاد شده است [۲۱]. انواع مختلفی از فین‌ها و با چینش‌ها و سطح مقطع‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان فین‌های عمودی، فین‌های متخلخل، فین‌های سوزنی، فین‌های مربعی و دایره‌ای و غیره را نام برد [۲۲]. اثر تغییر زاویه شیشه چگالنده و بازتابنده داخلی و خارجی و شیب آن‌ها بر عملکرد یک آب شیرین کن حوضچه‌ای ساده توسط خلیفه و ابراهیم [۲۳] به صورت آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفت.

ایوب و ملاب [۲۴] ایده استفاده از یک استوانه توخالی چرخان در حوضچه خورشیدی را مطرح و به صورت آزمایشگاهی، به بررسی آن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش سطح تبخیر، به کارگیری این ایده سبب افزایش ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصدی در میزان آب شیرین تولیدی نسبت به آب شیرین کن حوضچه‌ای بدون استوانه می‌شود. عبدالرحیم و لاشین [۲۵]، یک دستگاه آب شیرین کن حوضچه‌ای اصلاح شده ارائه و به صورت تجربی و تئوری روی آن مطالعه نمودند. دستگاه آن‌ها از یک آب شیرین کن حوضچه‌ای استاندارد و یک کلکتور سهموی خطی خورشیدی تشکیل شده بود. انرژی جمع‌آوری شده توسط کلکتور از طریق گردش سیال عامل (روغن)، در یک مبدل به آب درون حوضچه خورشیدی منتقل می‌شد. نتایج آن‌ها نشان داد، میزان آب تولیدی دستگاه اصلاح شده نسبت به دستگاه ساده به طور متوسط ۱۸٪ افزایش یافته است. تیواری و همکاران [۲۶]، ایده استفاده از یک آب شیرین کن حوضچه‌ای معکوس (با دریافت تابش از کف (زیر)) با بازتابنده سهموی را مطرح و به صورت عددی مورد

حوضچه‌ای چند اثره را مرور کردند و روش مختلف بهبود عملکرد آن‌ها را ارائه دادند. در سال ۲۰۱۴ مانوکار و همکاران [۹]، پارامترهای مؤثر بر نرخ تبخیر و تقطیر در یک آب شیرین کن حوضچه‌ای غیرفعال خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند.

همان‌طور که گفته شد، سردسازی پوشش شفاف می‌تواند باعث افزایش میزان آب شیرین تولیدی آب شیرین کن بشود. چندین روش مختلف برای کاهش دمای پوشش شفاف انجام شده است که شامل، سردسازی پوشش با استفاده از جریان آب روی آن [۱۰]، ایجاد جریان اجباری هوا روی آن [۱۱]، استفاده از سردکننده‌های ترموالکتریک [۱۲] اشاره کرد. مروری بر این روش‌ها، توسط اماره و همکاران انجام شده است [۱۳].

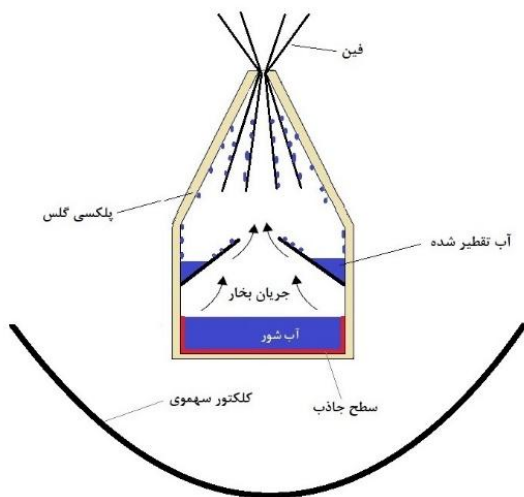
انرژی تابشی مهم‌ترین نقش را در فرآیند تولید آب شیرین بر عهده دارد و میزان آب شیرین تولیدی، به طور مستقیم با انرژی خورشیدی دریافتی متناسب است. به منظور افزایش میزان انرژی دریافتی توسط آب شیرین کن، می‌توان از متمرکز کننده‌ها و انعکاس‌دهنده‌ها (رفلکتورها)، استفاده از دنبال کننده‌های خورشیدی (Tracker) و انواع کلکتورهای خورشیدی شامل، صفحه تخت و لوله خلأ استفاده کرد [۱۴]، [۱۵].

میزان آب شیرین تولیدی توسط حوضچه خورشیدی، به صورت معکوس با عمق آب درون آن رابطه دارد؛ به طوری که هرچه عمق آب کاهش یابد، به دلیل بالا رفتن دمای آب شور میزان آب شیرین تولیدی افزایش می‌یابد. در حالت استاندارد حفظ حداقل عمق در حوضچه، بسیار دشوار است؛ زیرا باعث ایجاد نقاط خشک و کاهش کارایی شود. برای حفظ حداقل عمق، انواع فتیله و آب شیرین کن حوضچه‌ای پله‌ای (شیب‌دار) مورد استفاده قرار گرفتند [۱۶]. تیواری و جی تیواری [۱۷]، به صورت تجربی به بررسی اثر عمق بر کارایی آب شیرین کن حوضچه‌ای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین تولید و بازده، در عمق‌های کم قابل دستیابی است. همدو و عبداللطیف [۱۸]، به صورت عددی به بررسی تأثیر پارامترهای سرعت باد، عمق حوضچه، دمای محیط، دبی ورودی و رطوبت نسبی هوا بر میزان آب شیرین تولیدی یک آب شیرین کن حوضچه خورشیدی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عمق آب درون

استاندارد داده شده است. این تغییرات شامل اضافه کردن فین‌های استیل در قسمت کندانسور برای افزایش نرخ تقطیر، اضافه کردن سایبان روی فین‌ها و اضافه کردن سیم‌های استیل (اسفنج‌های سیمی)، جهت افزایش سطح آب و نرخ تبخیر است.



شکل ۱- آب‌شیرین‌کن ساخته‌شده و اجزاء آن



شکل ۲- طرح‌واره آب‌شیرین‌کن ساخته‌شده

دستگاه آب‌شیرین‌کن ساخته شده در این تحقیق، از سه قسمت حوضچه خورشیدی، کلکتور سهموی خطی و فریم (قاب) آب‌شیرین‌کن تشکیل شده است. در ادامه اجزاء مختلف دستگاه معرفی و به فرآیند طراحی آن‌ها اشاره خواهد شد.

بررسی قرار دادند. نتایج عددی نشان داد که این دستگاه قادر است تا ۲ برابر حالت معمولی آب شیرین تولید کند. متأسفانه این ایده ساخته نشده و نتایج تجربی برای آن گزارش نشده است.

هرچند مطالعات فراوانی جهت بهبود کارایی آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای انجام شده، ولی به نظر می‌رسد تا رسیدن به بهترین طرح این آب‌شیرین‌کن‌ها که آب را با هزینه کم و نرخ مطلوب تولید نماید، فاصله وجود دارد. این موضوع سبب شده است که هر ساله طرح‌ها و روش‌های جدیدی برای بهبود کارایی این آب‌شیرین‌کن‌ها ارائه شود. یکی از روش‌هایی که می‌تواند به بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای منجر شود، متمرکز کردن تابش خورشیدی است. افزایش شدت تابش سبب خواهد شد که بتوان در محل تمرکز به دماهای بالاتری نسبت به حالت معمول دست یافت. افزایش دمای کاری و کاهش سطح انتقال حرارت، با افزایش نرخ تبخیر سبب بهبود کارایی آب‌شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای می‌شود. در این تحقیق به منظور افزایش میزان آب تولیدی، یک طراحی جدید و نوآورانه از آب‌شیرین‌کن خورشیدی با عنوان آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی با متمرکز کننده سهموی خطی طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. مدل‌سازی حرارتی یکی از روش‌های کارآمد برای پیش‌بینی عملکرد هر سیستم حرارتی است. این روش گزینه‌ای مناسب برای پیدا کردن طرح‌های بهتر و بررسی پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم است. به این منظور در این تحقیق، با اعمال معادلات بقا انرژی، یک مدل حرارتی (ترمودینامیکی) برای مدل‌سازی رفتار آب‌شیرین‌کن توسعه و از آن برای پیش‌بینی عملکرد گذرا دستگاه در شرایط مختلف استفاده خواهد شد.

## ۲- طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن

آب‌شیرین‌کن ساخته شده در این تحقیق، از ترکیب و تجمیع آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای با کلکتور سهموی خطی به دست آمده است. آب‌شیرین‌کن ساخته شده در شکل ۱ و طرح‌واره آن در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به نیازهای طراحی جدید و به منظور بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن ساخته شده، در حوضچه خورشیدی به کاررفته در این تحقیق، تغییراتی نسبت به حوضچه‌ای خورشیدی

شود که برای جلوگیری از این امر، استفاده از سایه‌بان برای فین‌ها ضرورت دارد.

متمركز كننده سطح صیقلی براقی است که به شکل و انحنای مورد نظر، طراحی و خم می‌شود تا بتوان تمرکز نوری دلخواه را به دست دهد. یکی از ویژگی‌های مهم متمركز کننده‌های سهموی این است که تمام پرتوهایی که به سطح منعکس‌کننده برخورد می‌کنند، روی کانون آن متمركز شوند. در طراحی هندسه کلکتور سهموی، چهار کمیت زاویه لبه<sup>۱</sup> (زاویه لبه زاویه‌ای است که خط واصل لبه کلکتور و نقطه تمرکز با خط تقارن سهموی می‌سازد)  $\phi$ ، عرض دهانه<sup>۲</sup>  $a$ ، طول کلکتور (دهانه)  $L$  و فاصله کانونی  $f$  نقش دارند. طول کلکتور مستقل از دیگر پارامترها است و می‌تواند متناسب با نیاز انتخاب شود. از سه کمیت دیگر، دو کمیت مستقل هستند و مقدار کمیت سوم را می‌توان با داشتن دو کمیت دیگر به دست آورد. علاوه بر چهار کمیت فوق، گاهی کمیتی با عنوان عمق دهانه کلکتور  $h$  در محاسبات کلکتورهای سهموی استفاده می‌شود که رابطه مستقیمی با فاصله کانونی دارد. زاویه لبه نقش مهمی را در فاصله کانونی و عرض دهانه دریافت‌کننده (ریسیور) بازی می‌کند. در شکل ۳، برش عرضی از یک کلکتور سهموی و ابعاد و پارامترهای مؤثر در طراحی آن نشان داده شده است. در این شکل  $r$ ،  $R_r$  و  $\phi$  به ترتیب، شعاع سهموی در هر نقطه، شعاع منحنی در لبه کلکتور و زاویه هر نقطه روی سهمی است. معادله سهموی بر اساس محورهای مختصات کارتزینی به صورت رابطه (۱) است:

$$y = 4fx \quad (1)$$

$f$  اصله کانونی سهمی است و با استفاده از رابطه (۲) به زاویه لبه و عرض دهانه مرتبط می‌شود:

$$f = \frac{a}{2 \tan(\phi_r)} + \frac{a^2}{16f} \quad (2)$$

رابطه زاویه لبه با دو کمیت دیگر به صورت رابطه (۳) است:

$$\tan(\phi_r) = \frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \quad (3)$$

برای حوضچه خورشیدی، ابعاد ۶۰ سانتی‌متر طول، ۱۰ سانتی‌متر عرض و ۳۸ سانتی‌متر ارتفاع در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه این دستگاه به‌عنوان آب‌شیرین‌کن قابل‌حمل طراحی شده، استفاده از شیشه سبب آسیب‌پذیر بودن دستگاه در جابجایی‌ها می‌شود؛ بنابراین در دستگاه ساخته شده از پلکسی‌گلاس، به‌عنوان پوشش شفاف استفاده شده است. برتری‌های دیگر این پوشش نسبت به شیشه می‌توان به شفافیت بالا، وزن کمتر، قابلیت شکل‌پذیری راحت اشاره کرد.

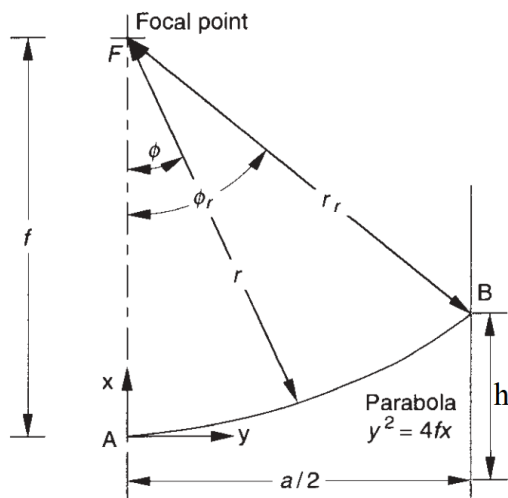
برای جذب حداکثری انرژی تابشی خورشید در زیر و قسمتی از اطراف حوضچه و از سمت داخل از یک صفحه جاذب از جنس استیل به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است. به‌منظور دریافت حداکثری تابش، سطح جاذب با رنگ سیاه پوشیده شده است. از آنجایی که نقطه تمرکز کلکتور به دلیل حرکت خورشید و ثابت بودن شیب فریم، در طول روز به دیواره‌های جانبی محفظه هم می‌رسد، صفحه جاذب دارای لبه‌هایی به عرض ۷/۵ سانتی‌متر است که دیواره‌های جانبی محفظه را هم پوشش داده است.

همانند آنچه در طرح‌واره آب‌شیرین‌کن نشان داده شده است، در دو طرف طولی حوضچه، دو ناودانی برای جمع‌آوری آب تقطیرشده قرار داده شده است. علاوه بر این به‌منظور ورود آب‌شور و خروج آب شیرین، در یک طرف قسمت عرضی حوضچه ۳ سوراخ ایجاد شده است که یک سوراخ برای ورود آب‌شور و دو سوراخ دیگر، برای خروج آب شیرین از ناودانی‌ها تعبیه شده است. برای ثابت نگه‌داشتن سطح آب درون حوضچه در عمق دلخواه (حدوداً ۴ سانتی‌متر)، یک شناور در ورودی آب‌شور قرار داده شده است.

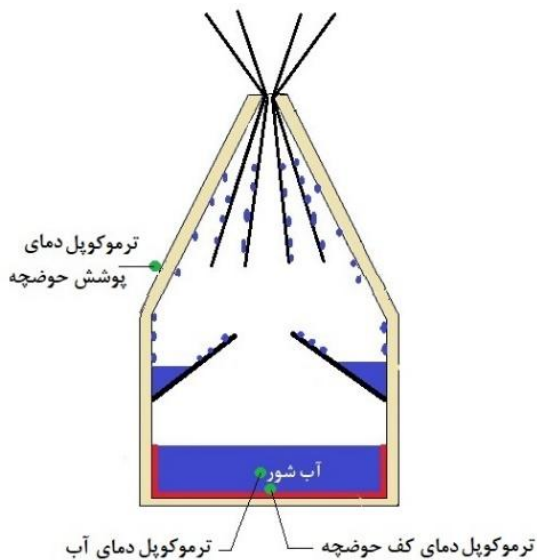
یکی از نوآوری‌های این تحقیق، بررسی اثر اضافه کردن فین به حوضچه خورشیدی برای افزایش میزان انتقال حرارت به محیط و افزایش نرخ تقطیر است. بدین منظور در قسمت بالایی محفظه، از ۸ عدد ورق استیل (۴ ورق در هر طرف محفظه) به‌عنوان خنک‌کننده استفاده شده است. این ورق‌ها به دلیل انتقال حرارت با هوای بیرون، باعث خنک شدن هوای داخل محفظه و تقطیر بخار آب روی ورق‌ها می‌شود. ورق‌های استیل به‌منظور خنک کاری استفاده شده است که در فصل تابستان پیش‌بینی می‌شود، این فین‌ها گرم شود و به‌صورت معکوس عمل کند و باعث گرم شدن داخل محفظه

<sup>۱</sup>Rim Angle  
<sup>۲</sup>Aperture Area or width

دمای محیط، شدت تابش خورشید، دمای آب درون حوضچه، دمای صفحه جاذب (کف) حوضچه (ورق استیل)، دمای پوشش خارجی حوضچه پوشش شفاف و همچنین حجم آب شیرین تولید شده، اندازه‌گیری شده است. با توجه به تغییرات کم دمای آب‌شور ورودی به حوضچه، این ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ محل نصب ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دما در طرح‌واره دستگاه آب‌شیرین‌کن نشان داده شده است.



شکل ۳- برش عرضی از کلکتور سهموی خطی و ابعاد و کمیت‌های طراحی آن



شکل ۴- محل قرارگیری حسگرهای (ترموکوپل‌های) دما

رابطه فاصله کانونی و عمق دهانه کلکتور، به صورت رابطه (۴) است:

$$f = \frac{a^2}{16h} \quad (4)$$

در این تحقیق، ابعاد دهانه کلکتور سهموی  $1\text{ m} \times 1/2\text{ m}$  در نظر گرفته شده است، به طوری که عرض دهانه سهموی ۱۲۰ سانتیمتر و طول آن ۱۰۰ سانتیمتر است. عمق دهانه کلکتور ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که فاصله کانونی متمرکز کننده با استفاده از معادلات فوق برابر  $22/5$  سانتی‌متر به دست می‌آید. با توجه به قابل‌حمل بودن دستگاه جنس صفحه بازتابنده از ورق استیل ضدزنگ براق (آینه‌ای) انتخاب شده است تا در برابر ضربات و شرایط محیطی مقاوم باشد. برای به دست آوردن طول ورق استیل، از نرم‌افزار رایگان parabola calculator استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر طول مختصات، منحنی سهموی را نیز به دست می‌دهد. با استفاده از این نرم‌افزار، طول ورق استیل موردنیاز برابر  $149/35$  سانتی‌متر به دست آمد.

طراحی و تنظیم سیستم نگهدارنده حوضچه خورشیدی طوری انجام می‌شود که زیر حوضچه در فاصله کانونی متمرکز کننده قرار گیرد. به منظور کاهش هزینه‌ها و پیچیدگی سیستم ساخته شده در این تحقیق، شیب کلکتور سهموی خطی ثابت است و خورشید را دنبال نمی‌کند.

پایه و یا فریم دستگاه طوری طراحی شده است تا بتوان کلکتور را در شیب دلخواه و حوضچه خورشیدی را در فاصله مناسب نسبت به کلکتور تنظیم کرد. به این منظور روی فریم ۳ ریل برای تنظیم کردن شیب (زاویه) کلکتور، محل قرارگیری عمودی (ارتفاع) و جایگاه (افقی) حوضچه خورشیدی تعبیه شده است.

### ۳- فرآیند آزمایش

دستگاه ساخته شده در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و در هوای بیرون و در محلی که در طول روز هیچ سایه‌ای روی آن نباشد و در بازه زمانی دی‌ماه ۱۳۹۴ مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین عملکرد دستگاه در سه حالت مختلف: حالت معمولی، استفاده از سیم‌های استیل در حوضچه و ایجاد سایه‌بان ب روی فین‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش‌های انجام شده

#### ۴-۱- موازنه انرژی برای صفحه جاذب

اعمال معادله بقاء انرژی برای صفحه جاذب با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده، رابطه (۵) را نتیجه می‌دهد:

$$m_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = I_p A_p - Q_{p-w} - Q_{p-amb} \quad (5)$$

در معادله بالا،  $m_p = 1.82 \text{ kg}$  نشان‌دهنده جرم صفحه جاذب،  $c_{p,p}$  ظرفیت گرمایی ویژه جاذب،  $T_p$  دمای صفحه جاذب،  $t$  زمان،  $A_p = 0.15 \text{ m}^2$  مساحت صفحه جاذب، زیرنویس  $P$ ، نشان‌دهنده صفحه جاذب، زیرنویس  $w$  نماد آب،  $I_p$  میزان تابش جذب شده به وسیله صفحه جاذب،  $Q_{p-w}$  انتقال حرارت رسانایی صفحه جاذب و آب،  $Q_{p-amb}$  هدر رفت حرارت از صفحه جاذب به محیط از کف و دیواره‌ها است. تابش جذب شده توسط سطح با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$I_p = \alpha \times \tau_{g1} \times \tau_{g2} \times r \times CR \times I_T \quad (6)$$

در معادله فوق،  $I_T$  تابش روی سطح شیب‌دار،  $\tau$  ضریب عبور، اندیس‌های  $g1$ ،  $g2$  مربوط به دولایه پلکسی‌گلاس زیر صفحه جاذب،  $\alpha$  ضریب جذب صفحه جاذب می‌باشند.  $r = 0.9$  ضریب انعکاس ورق استیل استفاده شده در کلکتور است. به علاوه  $CR$  ضریب تمرکز کلکتور سهموی خطی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$CR = A_c / A_p \quad (7)$$

در رابطه فوق  $A_c = 0.72 \text{ m}^2$  مساحت قسمتی از دهانه کلکتور است که در زیر حوضچه قرار دارد.

انتقال حرارت بین صفحه جاذب و آب با استفاده از معادله (۸) به دست می‌آید:

$$Q_{p-w} = h_{c,p-w} A_p (T_p - T_w) \quad (8)$$

$h_{c,p-w}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و آب است و از رابطه (۹) به دست می‌آید [۲۷]:

$$h_{c,p-w} = 0.54 \left( \frac{k_w}{X_w} \right) (Gr \times Pr)^{0.25} \quad (9)$$

در معادله فوق  $Gr$  و  $Pr$  به ترتیب اعداد پراتل و گراشف می‌باشند. علاوه بر این  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $X_w = 6 \text{ cm}$  فاصله کف حوضچه تا سطح آب می‌باشند.

تلفات حرارتی از حوضچه به محیط را با استفاده از مفهوم ضریب انتقال حرارت کلی و با رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$Q_{p-amb} = UA_p (T_p - T_{amb}) \quad (10)$$

دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری: برای اندازه‌گیری دماها از

دستگاه یونیورسال هیوکی مدل ۸۵۰۱ با ترموکوپل‌های نوع-K سیمی استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری این دستگاه  $\pm 0.1^\circ \text{C}$  است. جهت اندازه‌گیری تابش از پیرانومتر کیپ اند زونن مدل CM6B با دقت  $\pm 0.1$  و قابلیت تنظیم زمانی داده‌برداری استفاده شده است. میزان آب شیرین تولیدی به وسیله یک بشر مدرج با دقت ۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری دماها و تابش هر ۱۵ دقیق یک‌بار و با استفاده از دیتالاگر به صورت خودکار انجام شده است. اندازه‌گیری میزان آب شیرین تولیدی هر ۱ ساعت و به صورت دستی انجام شده است.

#### ۴- توسعه مدل حرارتی و حل عددی معادلات

به منظور ارزیابی نحوه عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای خورشیدی با متمرکز کننده سهموی خطی و پرداختن به تأثیر پارامترهای مختلف بر کارایی آن و شبیه‌سازی رفتار آن در شرایط مختلف یک مدل حرارتی برای آب‌شیرین‌کن ارائه شده است. به این منظور با استفاده از معادله بقاء انرژی، معادلاتی برای نحوه تغییرات دمای صفحه جذب، آب‌شور و پوشش پلکسی‌گلاس به دست آمده است. در توسعه مدل حرارتی فرضیات زیر به کار گرفته شده‌اند:

- سیستم در حالت شبه پایا کار می‌کند، یعنی در هر لحظه میزان بخار تولیدی برابر آب تقطیر شده است.

- با توجه به ابعاد کم حوضچه نسبت به دهانه ورودی کلکتور سهموی خطی، از تابش دریافتی در فین‌ها و سطوح جانبی محفظه حوضچه صرف‌نظر می‌شود.

- توزیع دمای آب، صفحه جاذب و پوشش شیشه‌ای یکنواخت در نظر گرفته شده است؛ اما همه این دماها وابسته به زمان در نظر گرفته شده‌اند.

با بررسی مکانیسم‌های انتقال جرم و انرژی بین قسمت‌های مختلف دستگاه می‌توان عملکرد آن را توصیف کرد. مهم‌ترین مکانیسم‌های انتقال حرارت در دستگاه، انتقال حرارت جابجایی، تابشی و تغییر فاز است. در ادامه معادلات بقاء انرژی برای قسمت‌های مختلف آب‌شیرین‌کن ارائه می‌شود.

حرارت تبخیری آب به کندانسور و ضریب انتقال حرارت تابشی آب به کندانسور می‌باشند. این کمیت‌ها با استفاده از معادلات (۱۶-۱۸) محاسبه شده‌اند [۴]:

$$h_{c,c-w} = 0.884(T_w - T_c) + \frac{(P_w - P_c)(T_w + 273)}{269.8 \times 10^{-2} - P_w} \quad (16)$$

$$h_{e,w-c} = 16.273 \times 10^{-3} h_{c,w-c} \left( \frac{P_w - P_c}{T_w - T_c} \right) \quad (17)$$

$$h_{r,w-c} = \varepsilon_{eff} \sigma [(T_w + 273)^2 (T_w + T_c + 546)] \quad (18)$$

در معادلات فوق،  $P_c$ ،  $P_w$  و  $\sigma$  به ترتیب فشار بخار در دمای آب، فشار بخار در دمای کندانسور و ثابت استفان بولتزمن می‌باشند [۴]. علاوه بر این  $\varepsilon_{eff}$ ، ضریب صدور مؤثر است که به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود [۴]:

$$\varepsilon_{eff} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right]^{-1} \quad (19)$$

در معادله فوق  $\varepsilon_w$  و  $\varepsilon_c$  به ترتیب، ضریب صدور آب و پوشش شیشه‌ای بوده و برابر  $\varepsilon_w = 0.95$  و  $\varepsilon_c = 0.86$  می‌باشند.

### ۳-۴- موازنه انرژی برای پوشش کندانسور

$$(m c_p)_c \frac{dT_c}{dt} = Q_{w-c} - Q_{c-amb} - Q_{fin} \quad (20)$$

در معادله (۲۰) انتقال حرارت از پوشش کندانسور به محیط و  $Q_{fin}$  انتقال حرارت پره‌های استیل (فین) با محیط اطراف است. انتقال حرارت از کندانسور به محیط با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_{c-amb} = A_s (h_{r,c-amb} + h_{c,c-amb})(T_c - T_{amb}) \quad (21)$$

در معادله فوق  $h_{r,c-amb}$  و  $h_{c,c-amb}$  به ترتیب ضرایب انتقال حرارت تابشی و جابجایی کندانسور به محیط می‌باشند و به صورت روابط (۲۲-۲۳) محاسبه می‌شوند [۲۷]:

$$h_{r,c-amb} = \varepsilon \sigma [(T_c + 273)^2 + (T_{amb} + 273)^2] [(T_c + 273) + (T_{amb} + 273)] \quad (22)$$

$$h_{c,c-amb} = Nu \times k_{air} / L_a \quad (23)$$

$$Nu = 0.59 (R_a)^{0.25} \quad (24)$$

در معادله فوق  $L_a = 0.2m$  طول مینا، زینویس  $air$  نماد هوا،  $R_a$  عدد رایلی و  $Nu$  عدد ناسلت است. انتقال حرارت فین با محیط اطراف از معادله (۲۵) به دست می‌آید:

در معادله فوق،  $T_{amb}$  دمای محیط،  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت از صفحه جاذب به محیط است. تلفات حرارتی از کف به صورت تلفات از چهار مقاومت موازی شامل، یک لایه پلکسی گلاس، یک لایه هوای ساکن، یک لایه پلکسی گلاس و هوای محیط تشکیل شده است که از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$U = \left[ \frac{1}{h_{c1}} + \frac{1}{\frac{L_g}{k_g}} + \frac{1}{\frac{L_g}{k_g}} + \frac{1}{\frac{L_{air}}{k_{air}}} \right]^{-1} \quad (11)$$

$L_{air} = 5cm$  فاصله هوایی زیر حوضچه،  $k_g$  و  $L_g = 0.5cm$  به ترتیب رسانایی حرارتی و ضخامت پلکسی گلاس می‌باشند. ضریب انتقال حرارت جابجایی پوشش شیشه‌ای کف محفظه به محیط ( $h_{c1}$ )، از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۴]:

$$h_{c1} = 5.8 + 3.8V \quad (12)$$

$V$  سرعت باد است. با توجه به اینکه در زمان انجام آزمایش‌ها سرعت باد خیلی کم بوده، در محاسبات، سرعت باد صفر در نظر گرفته شده است  $V = 0$ .

### ۲-۴- موازنه انرژی برای آب شور درون حوضچه

با داشتن عمق آب درون حوضچه،  $d$  و مساحت کف حوضچه،  $A_b = 0.06m^2$ ، جرم آب درون حوضچه با استفاده از معادله  $m_w = \rho_w A_b d$  به دست می‌آید. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها عمق آب درون حوضچه ۴ سانتیمتر است، جرم آب درون حوضچه ۲/۴ کیلوگرم است. اعمال معادله بقاء انرژی برای آب درون حوضچه معادله (۱۳) را نتیجه می‌دهد:

$$m_w c_{p,w} \frac{dT_w}{dt} = Q_{p-w} - Q_{w-c} \quad (13)$$

در معادله فوق،  $T_w$  دمای آب، زینویس  $c$  نماد کندانسور و  $Q_{w-c}$  انتقال حرارت از طریق فرآیندهای تبخیر، جابجایی و تابش آب به کندانسور (دیواره‌های کناری محفظه) است.  $Q_{w-c}$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_{w-c} = A_s h_{w-c} (T_w - T_c) \quad (14)$$

$$h_{w-c} = h_{r,w-c} + h_{e,w-c} + h_{c,w-c} \quad (15)$$

در معادلات فوق،  $T_c$  دمای کندانسور،  $A_s = 0.216m^2$  مساحت کندانسور،  $h_{e,w-c}$ ،  $h_{r,w-c}$  و  $h_{c,w-c}$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی آب به کندانسور، ضریب انتقال



$$\eta_{sys} = \frac{(\sum \dot{m}_{ew})h_{fg}}{A_c \times 3600 \times (\sum I_T(t))} \quad (29)$$

$$\eta_{still} = \frac{(\sum \dot{m}_{ew})h_{fg}}{A_p \times 3600 \times (\sum I_p(t))} \quad (30)$$

#### ۵-۴- روش حل معادلات

اعمال معادلات بقاء، منجر به سه معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول از سه متغیر مجهول دمای آب، دمای صفحه جاذب و دمای پوشش شد که به هم وابسته بوده و باید به طور هم‌زمان حل شوند. این معادلات در قالب یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده‌اند. در این برنامه با توجه به اینکه تغییرات نسبت به زمان خیلی شدید نیست، از حل-کننده ode 45 برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول استفاده شده است. برای هر روز آزمایش شرط اولیه برای سه معادله دیفرانسیل  $T_w, T_p$  و  $T_c$  به ترتیب، برابر مقادیر تجربی دمای صفحه جاذب، دمای آب و دمای کندانسور در لحظه شروع آزمایش قرار داده شده است؛ همچنین دمای محیط و شدت تابش خورشید در طول روز، برابر مقادیر تجربی در نظر گرفته شده‌اند. برای حل معادلات مقادیر خواص و کمیت‌های موجود در معادلات باید معلوم باشند. در جدول ۱ مقادیر این خواص و کمیت‌ها ارائه شده‌اند.

#### ۵- نتایج و بحث در آن‌ها

##### ۵-۱- بررسی اثر استفاده از سیم استیل و سایبان

همان‌طور که گفته شد، در این تحقیق اثر استفاده از سیم استیل درون حوضچه و اثر ایجاد سایبان روی فین‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است؛ به این منظور آزمایش‌هایی برای بررسی این موضوعات انجام شده است. آزمایش‌ها در هر کدام از ترکیب‌ها در حداقل دو روز انجام شده است. سپس به منظور مقایسه نتایج روزهایی انتخاب شده‌اند که شرایط جوی تقریباً یکسانی دارند. در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب تغییرات دمای محیط و شدت تابش خورشید برای روز حالت پایه (۲۷ دی‌ماه)، روز بررسی اثر اضافه کردن سایبان (۲۴ دی‌ماه) و روز بررسی اثر استفاده از سیم استیل و یا همان اسفنج فلزی (۲۵ دی‌ماه) نشان داده شده است. لازم به ذکر است، در هرروز فقط یک تغییر در آزمایش انجام شده است و

$$Q_{fin} = A_f h_{c3} (T_c - T_{amb}) \quad (25)$$

در معادله فوق  $A_f = 1.23 m^2$  مساحت مؤثر فین و  $h_{c3}$  ضریب انتقال حرارت جابجایی پره‌های استیل (فین) با هوای اطراف است که از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود.

$$h_{c3} = \frac{(Nu_{fin} \times k_{air})}{S} \quad (26)$$

در این رابطه  $S = 0.02 m$  فاصله متوسط بین پره‌ها است. برای جابجایی طبیعی بین فین‌ها و با توجه به تعداد و فاصله فین‌ها ناسلت برابر  $Nu_{fin} = 1.037$  به دست آمده است [۲۸].

##### ۴-۴- محاسبه میزان آب تولیدی و بازده روزانه

مهم‌ترین مؤلفه یک آب‌شیرین‌کن، میزان آب تولیدی آن است که آن را عملکرد دستگاه می‌نامیم. در محاسبات عددی میزان تولید آب شیرین با استفاده از معادله (۲۷) به دست می‌آید [۴]:

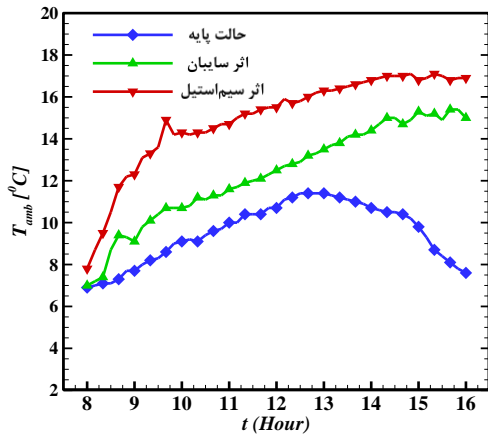
$$\dot{m}_{ew} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \frac{h_{e,w-c} (T_w - T_c)}{h_{fg}} \times 3600 \times A_p \quad (27)$$

در معادله فوق  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر آب است. این رابطه نرخ آب شیرین تولیدی را برحسب کیلوگرم بر ساعت به دست می‌دهد. برای به دست آوردن میزان آب تولیدی برحسب لیتر بر ساعت، از معادله (۲۸) استفاده می‌شود:

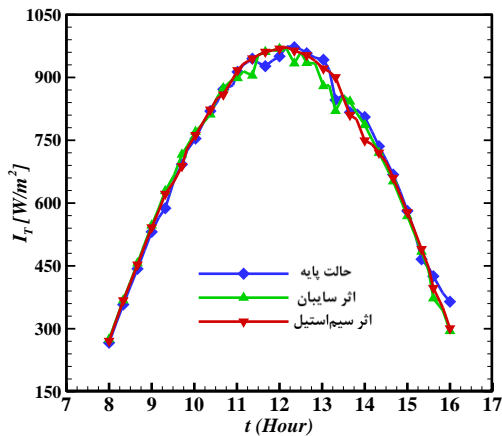
$$\dot{V} [L/h] = \dot{m}_{ew} / \rho_w \times 1000 [L/m^3] \quad (28)$$

با توجه به اینکه چگالی آب  $\rho_w \approx 1000 \text{ Kg m}^{-3}$  است، خواهیم داشت  $\dot{V} [L/h] = \dot{m}_{ew} [kg/h]$ . لازم به ذکر است، میزان تجمعی آب شیرین تولیدی،  $V [L] = m_{ew} [kg]$  با انتگرال‌گیری از معادله فوق در بازه زمانی آزمایش به دست می‌آید.

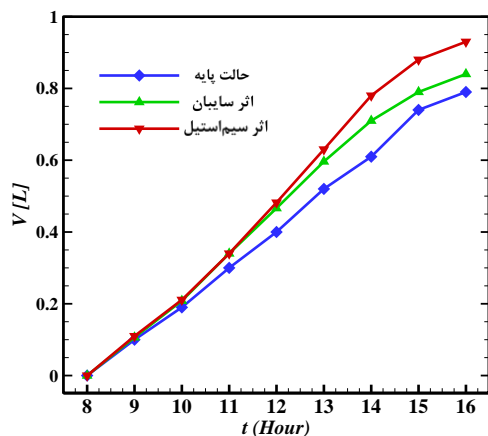
یکی دیگر از پارامترهای مهم در ارزیابی دستگاه‌های مختلف بازده آن‌ها است. در این تحقیق دو بازده تعریف شده است. بازده اول،  $\eta_{sys}$ ، بازده روزانه دستگاه می‌باشد که نشان می‌دهد چه کسری از انرژی تابشی رسیده به دهانه کلکتور سهموی خطی برای تبخیر آب به کار گرفته شده است. بازده دوم،  $\eta_{still}$ ، بازده روزانه حوضچه خورشیدی می‌باشد که به صورت کسری از تابش رسیده به صفحه جاذب حوضچه  $(I_p)$  که برای تولید آب شیرین به کار گرفته شده است. بازده روزانه دستگاه و حوضچه به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:



شکل ۵- تغییرات دمای هوا در روز پایه و روزهای آزمایش اثر سایبان و سیم استیل



شکل ۶- تغییرات شدت تابش خورشید در روز پایه و روزهای آزمایش اثر سایبان و سیم استیل



شکل ۷- مقایسه میزان تجمعی آب شیرین تولیدی در روز پایه و روزهای آزمایش اثر سایبان و سیم استیل

بقیه شرایط مشابه حالت پایه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سه روز آزمایش شدت تابش در سه روز تقریباً یکسان است، ولی بین دماهای محیط اختلافاتی وجود دارد. در شکل ۷ میزان تجمعی آب شیرین تولیدی در طول روز نشان داده شده است.

در جدول ۲ عملکرد دستگاه در حالت پایه، حالت اضافه کردن سیم استیل و حالت اضافه کردن سایبان روی فین‌ها مقایسه شده است. بررسی عملکرد دستگاه در این آزمایش نشان می‌دهد که میزان آب شیرین تولیدی با اضافه کردن سیم استیل، افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. به نحوی که میزان آب شیرین تولیدی، ۱۷/۷ درصد نسبت به حالت پایه افزایش داشته است. علاوه بر این اضافه کردن سایبان روی فین‌ها باعث افزایش در میزان آب شیرین تولیدی شده است. با این وجود میزان افزایش آب شیرین تولیدی، کم و حدود ۶/۳ درصد است.

جدول ۱- مقادیر خواص ترموفیزیکی مواد

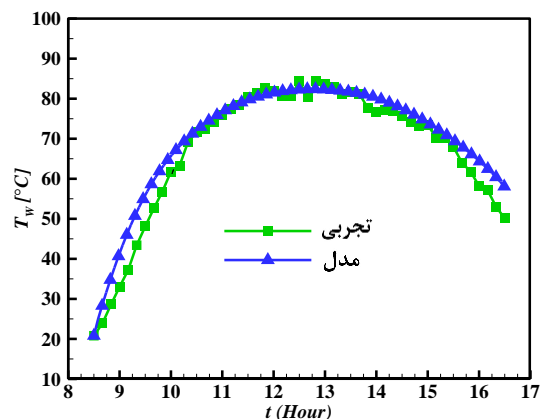
کمیت	تعریف	واحد	مقدار
$k_g$	رسانایی حرارتی پلکسی‌گلاس	$W (mK)^{-1}$	۰/۲
$k_{air}$	رسانایی حرارتی هوا	$W (mK)^{-1}$	۰/۰۲۵
$\tau_{g1}$	ضریب عبور	—	۰/۹
$\mu_{air}$	لزجت هوا	$kgm^{-1}$	۰/۰۰۰۰۱۷۹
$\alpha$	ضریب جذب	—	۰/۹
$k_w$	رسانایی حرارتی آب	$W (mK)^{-1}$	۰/۷
$\mu_w$	لزجت آب	$kgm^{-1}$	۰/۰۰۰۵۴۷
$C_{pw}$	ظرفیت گرمایی ویژه آب	$J (kgK)^{-1}$	۴۱۹۰
$g$	شتاب جاذبه	$ms^{-2}$	۹/۸۱
$\rho_{air}$	چگالی هوا	$kgm^{-3}$	۱/۲۲
$h_{fg}$	گرمای نهان تبخیر	$kJ (kg)^{-1}$	۲۲۵۷

جدول ۲- بررسی اثر اضافه کردن سیم استیل و سایبان

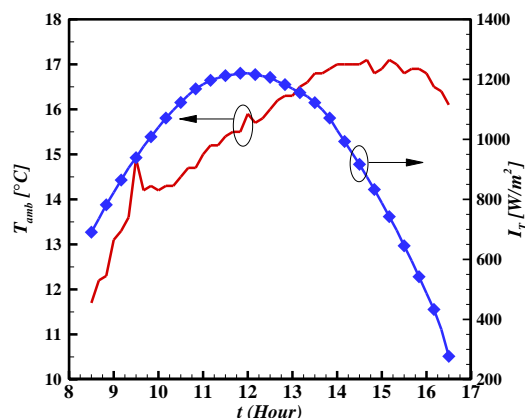
روز	حالت دستگاه	میزان آب شیرین (لیتر)	درصد افزایش
۲۷ دی‌ماه	پایه	۰/۷۹	—
۲۴ دی‌ماه	اثر سایبان	۰/۸۴	۶/۳ %
۲۵ دی‌ماه	اثر سیم استیل	۰/۹۳	۱۷/۷ %

۲-۵- اعتبارسنجی مدل حرارتی

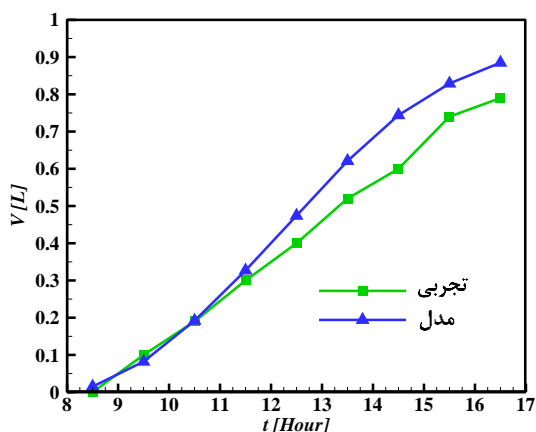
در این قسمت به بررسی نتایج مدل حرارتی و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی آب‌شیرین‌کن ساخته شده می‌پردازیم. بدین منظور نتایج تجربی و نتایج مدل حرارتی برای روز ۲۵ دی‌ماه ۱۳۹۴ مقایسه شده‌اند. در این روز تغییرات دمای هوا و میزان شدت تابش خورشیدی روی سطح کلکتور در طی بازه آزمایش به‌صورت شکل ۸ بوده است.



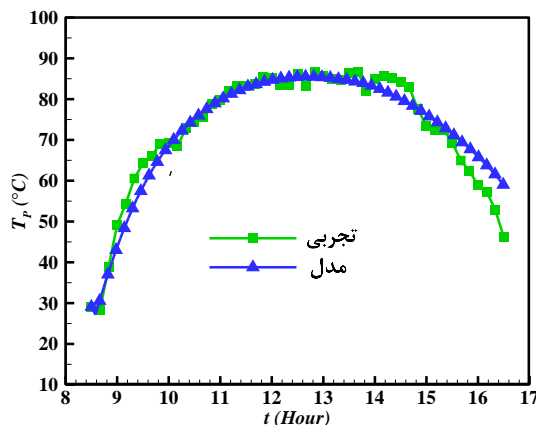
شکل ۱۰- مقایسه نتایج تجربی و مدل حرارتی - دمای آب (۲۵ دی‌ماه)



شکل ۸- دمای هوا و شدت تابش (۲۵ دی‌ماه)



شکل ۱۱- مقایسه نتایج تجربی و مدل حرارتی - میزان آب شیرین تولیدی تجمعی (۲۵ دی‌ماه)

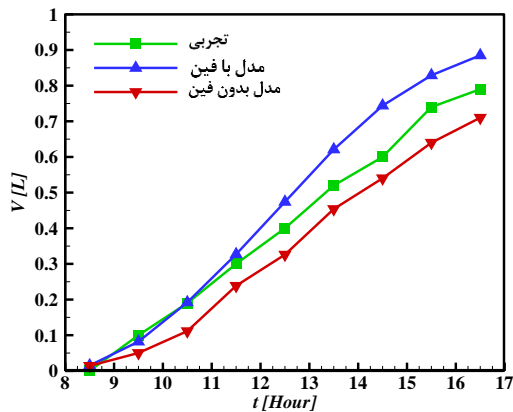


شکل ۹- مقایسه نتایج تجربی و مدل حرارتی - دمای صفحه جاذب (۲۵ دی‌ماه)

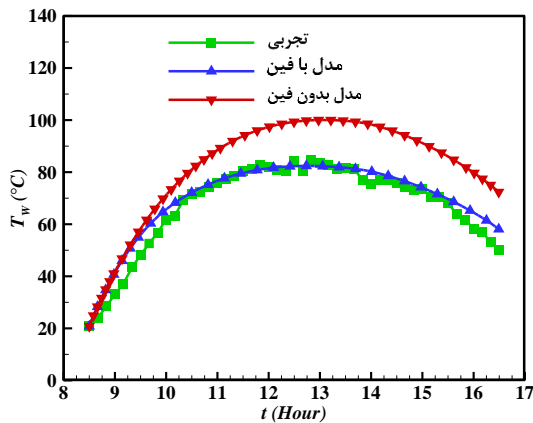
مقایسه میزان آب شیرین تولیدی: در شکل ۱۱ میزان تجمعی آب شیرین تولیدی دستگاه آب‌شیرین‌کن ساخته شده با میزان آب تخمین زده شده با استفاده از مدل حرارتی باهم مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌-

شود، مقایسه دمای صفحه جاذب و دمای آب: مقادیر اندازه‌گیری شده دمای صفحه جاذب و دمای آب به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ رسم شده و با نتایج مدل حرارتی مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به ظهر و افزایش شدت تابش، دمای صفحه جاذب و

مقایسه سعی شده است، این روزها طوری انتخاب شوند که در آن روز آسمان صاف بوده و یا تقریباً صاف باشد. با توجه به اینکه متمرکز کننده سهموی خطی دارای تنظیم زاویه شیب است، محاسبات برای شیب بهینه هر ماه سال انجام شده است. این شیب‌های بهینه از داده‌های جعفری و همکاران [۲۹] به دست آمده‌اند. در جدول ۳ زاویه بهینه برای روزهای منتخب هر فصل ارائه شده است.



شکل ۱۲- بررسی تأثیر استفاده از فین بر روی میزان آب تولیدی



شکل ۱۳- بررسی تأثیر استفاده از فین بر روی دمای آب

جدول ۳- زاویه شیب بهینه برای روزهای منتخب [۲۹]

۲۲	۲۴	۲۴	۲۲	روز سال
دی‌ماه	مهرماه	تیرماه	خردادماه	شیب بهینه (درجه)
۵۵/۶	۴۴/۵	صفر	صفر	

شود، همخوانی بسیار خوبی بین میزان آب محاسبه شده با استفاده از مدل حرارتی با نتایج تجربی وجود دارد. متوسط خطای نسبی در تخمین میزان آب شیرین تولیدی، کمتر از ۷ درصد است.

علاوه بر این شکل ۱۱ نشان می‌دهد که دستگاه ساخته شده در این تحقیق قادر است، در بازه ۸ صبح تا ۴ بعدازظهر، یعنی در بازه زمانی ۸ ساعتی در یک روز زمستانی، میزان حدود ۰/۹ لیتر آب شیرین تولید نماید.

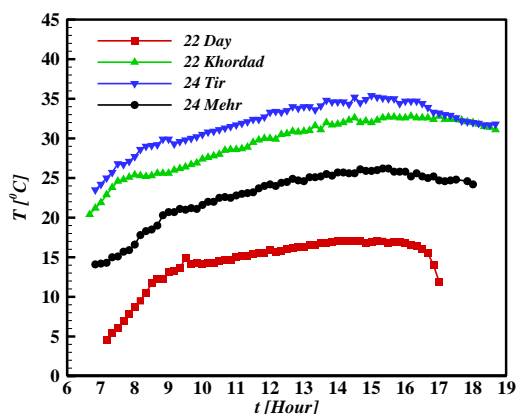
### ۳-۵- بررسی اثر فین بر عملکرد دستگاه

در تجهیزات مهندسی استفاده از فین‌ها، جهت افزایش ضریب انتقال حرارت بسیار معمول است. به منظور افزایش میزان انتقال حرارت از پوشش دستگاه و در نتیجه آن افزایش نرخ تقطیر، در دستگاه ساخته شده فین‌هایی روی قسمت کندانسور تعبیه شده است. از آنجایی که امکان جدا کردن این فین‌ها از دستگاه وجود نداشت، نتایج تجربی فقط برای حالت محفظه با فین گزارش شده است؛ بنابراین بررسی اثر استفاده از فین فقط به وسیله مدل حرارتی انجام شده است. بدین منظور برای مدل کردن اثر فین در مدل حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابجایی برای دو حالت بدون فین و با فین محاسبه و در کد مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳، تأثیر استفاده از فین به ترتیب بر میزان آب تولیدی و دمای آب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه دمای آب در حالت بدون فین افزایش می‌یابد، اما میزان آب تولیدی به دلیل کاهش میزان انتقال حرارت از کندانسور و افزایش تلفات حرارتی کاهش می‌یابد.

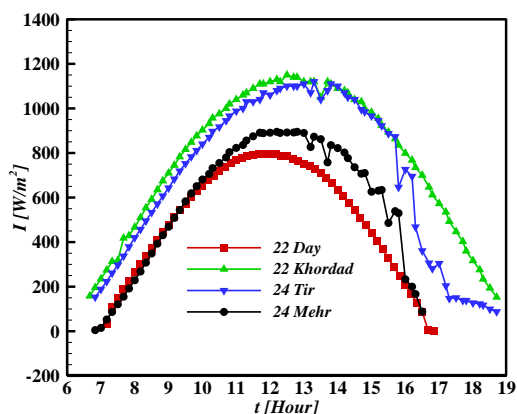
### ۴-۵- بررسی عملکرد سالانه دستگاه و پیش‌بینی

میزان آب تولیدی در فصول مختلف سال  
 آزمایش‌های تجربی روی دستگاه آب‌شیرین‌کن ساخته شده، فقط در چند روز از فصل زمستان انجام شده است. با توجه به دقت بسیار خوب مدل ارائه شده در این تحقیق، در این قسمت عملکرد آب‌شیرین‌کن در سایر فصول، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور برای روزهای متوسط هرماه میلادی با استفاده از داده‌های هواشناسی سال ۱۳۹۴ (۲۰۱۶ میلادی)، محاسبات انجام شده است. به منظور منطقی بودن

**بازده دستگاه:** با استفاده از روابط ارائه شده برای بازده، بازده حوضچه در روزهای منتخب هر فصل محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بازده روزانه حوضچه حدود ۶۵ درصد است که بازده بسیار خوبی برای یک دستگاه خورشیدی است ولی بازده کل سیستم نسبتاً پایین است. دلیل اینکه بازده سیستم پایین است این است که کلکتور سهموی خطی خورشید را دنبال نمی‌کند و در قسمتی از روز، تابش رسیده به دهانه آن به طور کامل به کف حوضچه تابیده نمی‌شود که خود منجر به کاهش بازده روزانه کل دستگاه می‌شود. چنانچه هدف گذاری این باشد که کلکتور سهموی خطی خورشید را دنبال کند، بازده کل سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۴- دمای هوای محیط در روزهای منتخب



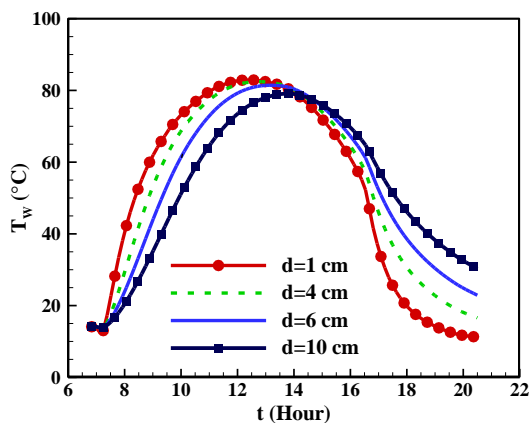
شکل ۱۵- شدت تابش روی سطح افق در روزهای منتخب

شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ به ترتیب دمای هوای محیط، شدت تابش خورشید روی سطح افق و شدت تابش خورشید روی سطح شیب‌دار را برای روزهای منتخب هر فصل نشان می‌دهد. روزها منتخب برای فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب، روزهای ۲۲ خردادماه، ۲۴ تیرماه، ۲۴ مهرماه و ۲۲ دی‌ماه انتخاب شده‌اند. برای محاسبه تابش روی سطح شیب‌دار با استفاده از تابش روی سطح افق از مدل آسمان ایزوتروپیک استفاده شده است. جزئیات این مدل در کتاب دافی و همکاران [۳۰] آورده شده و برای پرهیز از طولانی شدن متن در اینجا آورده نشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای روزهای مختلف تابش روی سطح افق به‌طور قابل ملاحظه‌ای با همدیگر فرق دارند، ولی تابش روی سطح شیب‌دار برای روزهای مختلف، اختلاف کمتری دارند. دلیل این امر این است که خورشید در فصل زمستان در ارتفاع کمتری قرار دارد و تابش رسیده به سطح افق کم است. حال چنانچه سطح به نحوی قرار گیرد که پرتو تابش عمود بر سطح باشد و هوا هم صاف و بدون گردوغبار باشد، شدت تابش در فصول مختلف سال، تفاوت قابل توجهی نخواهند داشت. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در فصل زمستان طول روز کم است، میزان انرژی تابشی روزانه در حالت کلی، کمتر از فصل تابستان است.

با به‌کارگیری داده‌های آب و هوایی در روزهای منتخب هر فصل و حل معادلات مدل حرارتی میزان آب شیرین تولید شده در هر روز تخمین زده شده است. در شکل ۱۷ میزان تجمعی آب شیرین تولیدی تخمین زده شده با استفاده از مدل حرارتی ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده، تولید دستگاه در ۲۲ خردادماه حداکثر و روزانه حدود ۱/۱۴ لیتر است؛ درحالی‌که در ۲۲ دی‌ماه این مقدار به حداقل خود، یعنی حدود ۰/۹ لیتر بر روز می‌رسد. ذکر این نکته ضروری است که دو عامل پارامتر اساسی در میزان آب شیرین تولیدی میزان تابش (شدت تابش و انرژی تابشی روزانه) و دمای محیط می‌باشند. با توجه به اینکه برای روزهای مورد بررسی، تابش خورشید روی سطح شیب‌دار در ۲۴ تیر کمتر و دمای محیط بیشتر از ۲۲ خرداد بوده است، برخلاف آنچه انتظار می‌رفت، میزان آب شیرین تولیدی در ۲۲ خرداد، بیشتر از مقدار آن در ۲۴ تیرماه است.

به صورت عددی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور محاسبات با استفاده از مدل حرارتی و برای عمق‌های ۱، ۴، ۶ و ۱۰ سانتی‌متر و با استفاده از داده‌های تابش و هوای محیط روز ۲۲ دی‌ماه انجام شده است. دمای هوای محیط و شدت تابش در این روز قبلاً در شکل ۱۴ و شکل ۱۶ ارائه شده است.

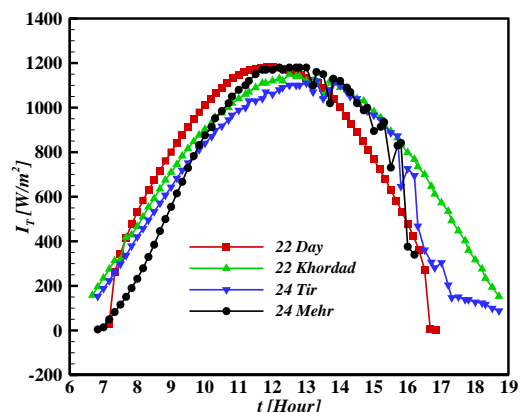
در شکل ۱۸ اثر عمق آب درون حوضچه، دمای آب درون حوضچه نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با کاهش عمق وابستگی تغییرات دما به تابش بیشتر شده و دمای آب تقریباً هم‌فاز با تغییرات شدت تابش تغییر می‌نماید. در عمق‌های کم با افزایش شدت تابش با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی (حدود ساعت ۱۲)، دمای آب به شدت تغییر می‌نماید و در بعدازظهر با فاصله گرفتن از ظهر دما به شدت تغییر می‌نماید. با افزایش عمق آب، تغییرات دما با اختلاف فاز بیشتری نسبت به تغییرات شدت تابش عکس‌العمل نشان می‌دهد و بیشینه دمای آب در فاصله بیشتری از ظهر اتفاق می‌افتد، ضمن اینکه بیشینه دمای آب نیز کاهش می‌یابد.



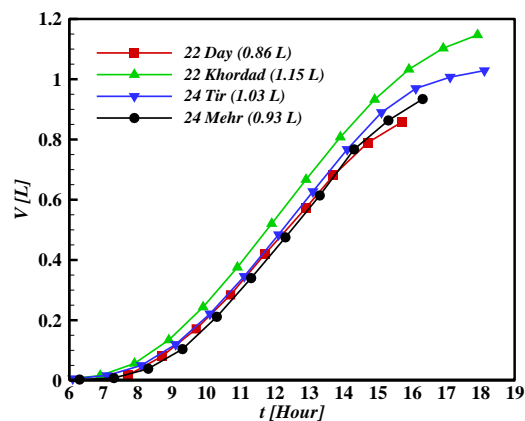
شکل ۱۸- اثر عمق آب بر دمای آب درون حوضچه

بررسی اثر عمق بر روی بازده روزانه آب شیرین‌کن:

شکل ۱۹ تغییرات بازده حوضچه را برحسب عمق آب درون حوضچه نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق بازده حوضچه کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار این است که همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، با افزایش عمق تغییرات دما کندتر شده و با توجه به اینکه



شکل ۱۶- شدت تابش روی سطح شیب‌دار در روزهای منتخب



شکل ۱۷- مقایسه میزان آب تولیدی تجمعی در روزهای منتخب هر فصل

جدول ۴- بازده روزانه حوضچه در روزهای منتخب

روز منتخب	بازده روزانه حوضچه (درصد)	بازده روزانه دستگاه (درصد)
۲۲ خردادماه	۶۵/۱	۹/۸
۲۴ تیرماه	۶۵/۳	۹/۷۷
۲۴ مهرماه	۶۵/۲	۹/۸
۲۲ دی‌ماه	۶۴	۹/۶

#### ۵-۵- بررسی اثر عمق آب درون حوضچه بر عملکرد آب شیرین‌کن

از عوامل مؤثر بر عملکرد آب شیرین‌کن‌ها، عمق آب درون حوضچه است. در این قسمت اثر عمق آب روی دمای آب و میزان آب شیرین تولیدی، توسط دستگاه آب شیرین‌کن

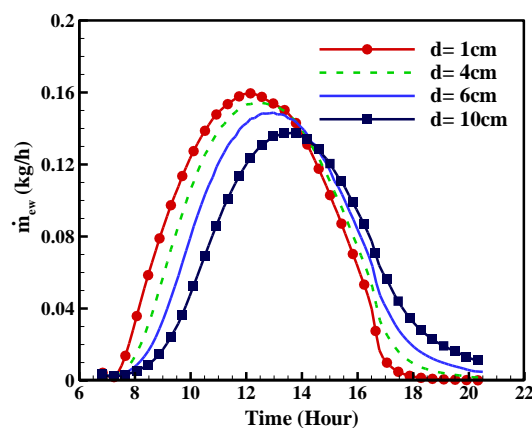
حوضچه‌های خورشیدی به‌دست آمده، طراحی و ساخته شده است. آب‌شیرین‌کن ساخته شده در شهر کرمان (ماهان)، در هوای آزاد مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش‌های انجام شده روی آب‌شیرین‌کن نشان می‌دهند که این دستگاه قادر است، در حالت پایه حدود ۰/۸ لیتر در روز آب شیرین تولید نماید و با اضافه کردن سیم‌های استیل (اسفنج‌های فلزی)، میزان آب شیرین تولیدی به حدود ۰/۹ لیتر بر روز (۱۷/۷) درصد افزایش نسبت به حالت پایه می‌رسد. علاوه بر این اضافه کردن سایبان روی فین‌ها، باعث افزایش ۶/۳ در میزان آب شیرین تولیدی می‌شود.

در ادامه به‌منظور تخمین کارایی آب‌شیرین‌کن در شرایط مختلف و بررسی اثر عوامل مختلف بر عملکرد آن، یک مدل حرارتی (بر پایه ترمودینامیک) برای آب‌شیرین‌کن توسعه داده شده است. در این مدل تمامی پدیده‌های انتقال حرارت شامل تابش، جابجایی، رسانایی، تبخیر و میعان لحاظ شده است. معادلات حاکم در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و حل شده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، نتایج حاصل از این مدل‌سازی شامل، دمای آب، دمای صفحه جاذب و میزان آب تولیدی با داده‌های تجربی آب‌شیرین‌کن مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که همخوانی خوبی بین نتایج تجربی و نتایج مدل حرارتی وجود دارد و متوسط خطا در تخمین همه کمیت‌ها، کمتر از ۶ درصد بوده است. سپس با استفاده از این مدل رفتار دستگاه در روزهای منتخب فصول مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تولید در خردادماه و روزانه حدود ۱/۱۴ لیتر است؛ درحالی‌که در زمستان و در دی‌ماه این مقدار به حداقل خود یعنی حدود ۰/۹ لیتر می‌رسد.

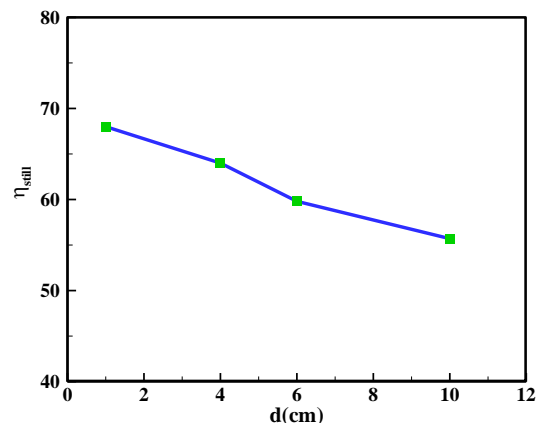
### ۷- مراجع

- [1] Kalogirou SA (2005) Seawater desalination using renewable energy sources. Prog Energy Combust Sci 31(3): 242-281.
- [2] Najafi G, Ghobadian B, Mamat R, Yusaf T, Azmi WH (2015) Solar energy in Iran: Current state and outlook. Renewable Sustainable Energy Rev 49: 931-942.
- [3] Desalination From Wikipedia, Accessed; [https://en.wikipedia.org/wiki/Desalination#cite\\_note-e-5](https://en.wikipedia.org/wiki/Desalination#cite_note-e-5).
- [4] Sampathkumar K, Arjunan TV, Pitchandi P, Senthilkumar P (2010) Active solar distillation-A

میزان تبخیر متناسب با دمای آب است، نرخ تبخیر کمتر می‌شود. کاهش نرخ تبخیر سبب می‌شود، آب زمان بیشتری در حوضچه بماند؛ بنابراین تلفات حرارتی از کف حوضچه بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است، هرچند خروج حرارت از کندانسور نقش مثبتی در تولید آب شیرین دارد، اما خروج حرارت از کف حوضچه که مستقیماً با آب در تماس است، باعث کاهش دمای آب و کاهش تبخیر شده و نقش منفی بر بازده دارد.



شکل ۱۹- اثر عمق آب درون حوضچه بر نرخ آب شیرین تولیدی



شکل ۲۰- اثر عمق آب درون حوضچه بر بازده روزانه حوضچه

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک آب‌شیرین‌کن جدید خورشیدی که از ترکیب یک کلکتور سهموی خطی و یک آب شیرین

- the annual and seasonal performance of a single slope passive solar still: the effect of water depths. *Desalination* 207(1-3): 184-204.
- [18] Hamadou OA, Abdellatif K (2014) Modeling an active solar still for sea water desalination process optimization. *Desalination* 354: 1-8.
- [19] Hansen RS, Narayanan CS, Murugavel KK (2015) Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh. *Desalination* 358: 1-8.
- [20] Shukla S, Sorayan V (2005) Thermal modeling of solar stills: an experimental validation. *Renew Energy* 30(5): 683-699.
- [21] Velmurugan V, Gopalakrishnan M, Raghu R, Srithar K (2008) Single basin solar still with fin for enhancing productivity. *Energy Convers Manage* 49(10): 2602-2608.
- [22] Alaian W, Elnegiry E, Hamed AM (2016) Experimental investigation on the performance of solar still augmented with pin-finned wick. *Desalination* 379: 10-15.
- [23] Khalifa AJN, Ibrahim HA (2010) Effect of inclination of the external reflector of simple solar still in winter: An experimental investigation for different cover angles. *Desalination* 264(1): 129-133.
- [24] Malaeb L, Aboughali K, Ayoub GM (2016) Modeling of a modified solar still system with enhanced productivity. *Sol Energy* 125: 360-372.
- [25] Abdel-Rehim ZS, Lasheen A (2007) Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt. *Desalination* 217(1-3): 52-64.
- [26] Tiwari GN, Suneja S (1998) Performance evaluation of an inverted absorber solar still. *Energy Convers Manage* 39(3-4): 173-180.
- [27] Tiwari GN, Dimri V, Singh U, Chel A, Sarkar B (2007) Comparative thermal performance evaluation of an active solar distillation system. *Int J Energy Res* 31(15): 1465-1482.
- [28] Çengel YA, Boles MA (2002) *Thermodynamics: An engineering approach*. McGraw-Hill.
- [29] Jafari S, Javaran EJ (2012) An optimum slope angle for solar collector systems in kerman using a new model for diffuse solar radiation. *Energy source A, Recovery util environ effects* 34(9): 799-809.
- [30] Duffie JA, Beckman WA (2013) *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- detailed review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 14(6): 1503-1526.
- [5] Shatat M, Worall M, Riffat S (2013) Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. *Sustain Cities Soc* 9: 67-80.
- [6] Zhang Y, Sivakumar M, Yang S, Enever K, Ramezani-pour M (2018) Application of solar energy in water treatment processes: A review. *Desalination* 428: 116-145.
- [7] Kalidasa Murugavel K, Chockalingam KKSK, Srithar K (2008) Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. *Desalination* 220(1-3): 677-686.
- [8] Rajaseenivasan T, Murugavel KK, Elango T, Hansen RS (2013) A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still. *Renewable Sustainable Energy Rev* 17: 248-259.
- [9] Muthu Manokar A, Kalidasa Murugavel K, Esakkimuthu G (2014) Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still - A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 38: 309-322.
- [10] Somwanshi A, Tiwari AK (2014) Performance enhancement of a single basin solar still with flow of water from an air cooler on the cover. *Desalination* 352: 92-102.
- [11] El-Sebaï A (2000) Effect of wind speed on some designs of solar stills. *Energy Convers Manage* 41(6): 523-538.
- [12] Esfahani JA, Rahbar N, Lavvaf M (2011) Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still—an experimental study on winter days. *Desalination* 269(1-3): 198-205.
- [13] Omara ZM, Abdullah AS, Kabeel AE, Essa FA (2017) The cooling techniques of the solar stills' glass covers – A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 78: 176-193.
- [14] Shanmugan S, Rajamohan P, Mutharasu D (2008) Performance study on an acrylic mirror boosted solar distillation unit utilizing seawater., *Desalination* 230(1-3): 281-287.
- [15] Nassar YF, Yousif SA, Salem AA (2007) The second generation of the solar desalination systems. *Desalination* 209(1-3): 177-181.
- [16] Omara Z, Kabeel A, Younes M (2013) Enhancing the stepped solar still performance using internal reflectors. *Desalination* 314: 67-72.
- [17] Tiwari AK, Tiwari G (2007) Thermal modeling based on solar fraction and experimental study of