

طراحی، ساخت و بررسی آزمایشگاهی عملکرد یک آبشیرین کن خورشیدی شیب‌دار بهبودیافته

حسین امیری*

استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه
 تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، hosseinamiri2010@gmail.com

چکیده

در این تحقیق یک دستگاه آبشیرین کن جدید، به نام آبشیرین کن شیب‌دار (آبشاری) بهبودیافته، برای شیرین‌سازی آب‌های شور با استفاده از انرژی خورشیدی ارائه شده است. این آبشیرین کن از اضافه کردن یک چگالنده جداگانه ولی یکپارچه به یک آبشیرین کن شیب‌دار استاندارد به وجود آمده است. فضای چگالنده از طریق دو فاصله هوایی در پایین و بالای صفحه جاذب به قسمت تبخیر آبشیرین کن مرتبط است. گردش هوا بین دو قسمت به صورت طبیعی (جریان آزاد) صورت می‌گیرد. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد آبشیرین کن جدید، یک آبشیرین کن استاندارد نیز با همان مشخصات و ابعاد ساخته شد. آبشیرین‌کن‌های ساخته شده در چند روز از فصل بهار (روزهای ۱۱ و ۱۲ خرداد) و چند روز از فصل پاییز (روزهای ۱۰ و ۱۱ مهرماه) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که آبشیرین کن بهبودیافته عملکرد بهتری نسبت به آبشیرین کن استاندارد داشته است به طوری که آب شیرین تولیدی توسط این آبشیرین کن بین ۷۶ تا ۱۲۷ درصد بیشتر از آب شیرین تولیدی توسط آبشیرین کن استاندارد می‌باشد. بیشینه میزان آب شیرین تولیدی این دستگاه در هر روز برحسب مترمربع مساحت اشغال شده توسط آبشیرین کن برابر ۴/۵۷ لیتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، آبشیرین کن بهبودیافته، چگالنده خارجی، گردش طبیعی، شیب‌دار، حوضچه‌ای.

Design, fabrication, and experimental analysis of improved stepped solar still

H. Amiri

Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Kerman, Iran

Abstract

In this study, a new desalination system, called an improved stepped solar still, is proposed to desalinate saline water using solar energy. This desalination system is created by adding a separate but integrated condenser to a standard stepped solar still. The condenser space is connected to the desalination section by two air gaps at the bottom and top of the absorber plate. Air circulation between the two parts occurs naturally (free flow). To compare and evaluate the performance of the new desalination systems, a standard stepped solar still was built with the same specifications and dimensions. The two solar stills are tested and compared in a few days of spring (June 11 and 12) and in a few days of autumn (October 10 and 11). The experimental results show that the improved stepped solar still has a better performance than the standard ones so that the freshwater produced by improved solar still is between 76 to 127% more than the freshwater produced by the standard ones. The maximum daily amount of freshwater produced by the improved solar still per square meter of occupied area of solar still area equals 4.57 liters.

Keywords: Solar Energy, improved stepped solar still, External Condenser, Natural Convection, Stepped, Still.

۱- مقدمه

توسعه داده شده‌اند. هر یک از این دستگاه‌ها مزایا و محدودیت‌های مرتبط با خود را دارند و بسته به نوع کاربرد به کار گرفته می‌شوند. برای تولید آب شیرین در میزان کم آبشیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی گزینه مناسبی می‌باشند. از مزایای این آبشیرین‌کن‌ها می‌توان به ساخت آسان و ارزان، هزینه نگهداری پایین، کیفیت بالای آب تولیدی اشاره نمود [۱، ۲]. با این وجود، آبشیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی استاندارد مشکلاتی دارند که باعث شده است نرخ آب شیرین تولید شده در آن‌ها نسبتاً کم باشد. یکی از مشکلات این آبشیرین‌کن‌ها افقی بودن سطح آب داخل حوضچه است که باعث می‌شود انرژی خورشیدی کمتری نسبت به یک سطح شیب‌دار به آن برسد. با توجه به مشکلات آبشیرین‌کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی استاندارد، محققان از سال‌ها پیش در حال بررسی روش‌های ممکن برای افزایش کارایی آن‌ها هستند [۳-۸].

به منظور رفع مشکل افقی بودن صفحه جاذب آبشیرین‌کن‌های حوضچه‌ای استاندارد، آبشیرین‌کن‌های حوضچه‌ای شیب‌دار (پله‌دار)^۱

در دهه های اخیر به علت افزایش جمعیت و افزایش سرانه مصرف، استفاده از منابع آبی به حدی افزایش یافته که به عقیده بسیاری از صاحب نظران منابع آب شرب موجود، در آینده ای نزدیک، توان پاسخگویی به نیازهای روزافزون بشر را نخواهد داشت. با توجه به فراوانی آب‌های شور (اقیانوس‌ها، دریاها و منابع محلی) صنعت شیرین‌سازی آب یک‌راه حل منطقی و مطمئن برای حل بحران کمبود آب به شمار می‌آید. روش‌ها و فرآیندهای مختلفی برای شیرین‌سازی آب وجود دارد که همه آن‌ها به انرژی حرارتی و یا الکتریکی نیاز دارند. در حال حاضر عمده انرژی مورد نیاز سامانه‌های شیرین‌سازی آب، از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. با توجه به محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها، انتخاب منابع جایگزین انرژی ضرورت پیدا می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منابع پاک و پایدار انرژی مورد توجه قرار گرفته است.

آبشیرین‌کن‌های خورشیدی متعددی برای شیرین‌سازی آب

^۱ Stepped solar still

ارائه شده‌اند. در این آب شیرین کن‌ها، کف حوضچه به صورت (پلکانی) شیب‌دار ساخته می‌شود به عبارت دیگر حوضچه بزرگ و افقی در نوع استاندارد با چندین حوضچه کوچک و افقی ولی بر روی یک سطح شیب‌دار جایگزین می‌شود. هر چند آب شیرین کن‌های شیب‌دار کارایی بهتری نسبت به آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای دارند، با این وجود به منظور افزایش‌های هر چه بیشتر میزان آب شیرین تولیدی آن‌ها مطالعات فراوانی انجام شده است. ولمورگان و همکاران [۹] به بررسی اثر عمق حوضچه‌ها بر کارایی آب شیرین کن‌های شیب‌دار پرداختند و نتیجه گرفتند عمق کمتر حوضچه‌ها باعث بهبود عملکرد آب شیرین کن می‌شود. کابیل و همکاران [۱۰] به صورت تجربی به بررسی اثر عمق و عرض پلکان‌ها بر میزان تولید آب توسط آب شیرین کن حوضچه‌ای شیب‌دار پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که میزان تولید آب شیرین توسط این دستگاه در ابعاد بهینه پلکان‌ها حدود ۵۷ درصد بیشتر از آب شیرین کن حوضچه‌ای استاندارد می‌باشد. گاونده و بویار [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل کف حوضچه‌ها (پلکان‌ها) بر میزان آب شیرین تولیدی آب شیرین کن‌های شیب‌دار پرداختند. آزمایش‌ها نشان دادند که آب شیرین کن‌های با صفحه جاذب مقعر و محدب به ترتیب ۲۹ و ۵۶ درصد بیشتر از آب شیرین کن شیب‌دار با کف صاف آب شیرین تولید می‌نمایند. یوزید و همکاران [۱۲] به صورت تئوری به بررسی طرح جدیدی از آب شیرین کن‌های شیب‌دار پرداختند که در آن زاویه شیب پوشش شیشه‌ای متفاوت از زاویه شیب صفحه جاذب بود. به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت از صفحه جاذب، ابوجازر و همکاران [۱۳] به بررسی شیرین‌سازی آب دریا با استفاده از آب شیرین کن شیب‌دار با صفحه جاذب از جنس مس در شرایط آب و هوایی استوایی پرداختند. روش‌های به کار گرفته شده توسط محققین مختلف جهت افزایش کارایی آب شیرین کن‌های شیب‌دار توسط کابیل و همکاران [۱۴] مرور و دسته‌بندی شده است. در یک مقاله مروری به زبان فارسی باقری اسفه و همکاران [۱۵] به بررسی انواع مختلف آب شیرین کن خورشیدی‌های پرداخته و روش‌های ارائه شده در تحقیقات پیشین برای افزایش بازده این آب شیرین کن‌ها را مرور کرده‌اند.

یکی از مشکلات آب شیرین کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای (شیب‌دار و یا استاندارد) منسجم بودن فرآیند دریافت انرژی تابشی، تبخیر و تقطیر در یک محفظه می‌باشد که باعث می‌شود کارایی این دستگاه‌ها کاهش یابد. جداسازی فرآیند تبخیر و میعان برای آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای استاندارد توسط محققین مختلفی بررسی شده است. به منظور جداسازی مکان تبخیر و میعان در آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای، یکی از ایده‌ها، استفاده از آب شیرین کن‌های دو شیب بوده است. در این آب شیرین کن‌ها، این دو شیب به گونه‌ای طراحی می‌شود که قسمت شیب‌دار بزرگ رو به خورشید باشد و قسمت شیب‌دار کوچک تا حد ممکن در معرض تابش خورشید نباشد و به عنوان چگالنده استفاده شود [۱۶-۱۸].

یک ایده دیگر برای جداسازی مرحله تبخیر و میعان در آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای استفاده از چگالنده خارجی مجزا می‌باشد. در این زمینه نیز مطالعات زیادی انجام شده است [۱۹] که در ادامه به چند مورد آن اشاره می‌شود. مادلوپا و جوهانسون [۲۰] آب شیرین کن خورشیدی غیرفعال و با چگالنده مجزا را ارائه و مورد بررسی قرار دادند. الهمدانی و شوکلا [۲۱] ایده استفاده از یک

آب شیرین کن حوضچه‌ای چندمرحله‌ای را به عنوان چگالنده یک آب شیرین کن حوضچه‌ای بزرگ، مورد بررسی قرار دادند. بهار دوج و همکاران [۲۲] اثر استفاده از یک چگالنده مجزا (خارجی) با سطح فین مانند را مورد مطالعه قرار دادند. فتح و همکاران [۲۳] به صورت عددی کارایی حرارتی گذرای یک آب شیرین کن حوضچه‌ای رطوبت زنی- رطوبت‌زدایی به همراه یک چگالنده غیرفعال را مورد مطالعه قرار دادند. وفایی و همکاران [۲۴] روش‌های مختلفی شامل تعبیه تعدادی پره روی پله‌ها، استفاده از بازتابنده‌های داخلی در پایه پله‌ها و نهایتاً استفاده از چگالنده خارجی در قسمت بالای یک آب شیرین کن پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. ترکیبات مختلفی از این تغییرات مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که اعمال هر سه تغییر به طور هم‌زمان بهترین عملکرد را ایجاد می‌نماید و باعث افزایش ۲۲ درصدی میزان آب شیرین تولیدی می‌شود. در ادامه این کار شهری و همکاران [۲۵] با استفاده از یک شبیه‌ساز خورشیدی به بررسی اثر دبی آب‌شور بر عملکرد این آب شیرین کن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که هر چند عملکرد دستگاه در دبی‌های پایین‌تر بهتر است ولی این بهبود عملکرد هم حدی دارد و چنانچه دبی به مقداری کمتر از ۰/۰۸۶ لیتر بر دقیقه برسد کاهش عملکرد آب شیرین کن را به همراه خواهد داشت. اخیراً گشایشی و همکاران [۲۶] به بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی و یک منبع ذخیره انرژی گرمایی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. گشایشی و همکاران [۲۷] در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثر هندسه صفحه جاذب و شیب صفحه پوشاننده (شیشه) بر عملکرد آب شیرین کن پله‌ای پرداختند. اخیراً شعبی و همکاران [۲۸] به مرور روش‌های افزایش هم‌زمان نرخ تبخیر و میعان (تقطیر) در آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی پرداختند.

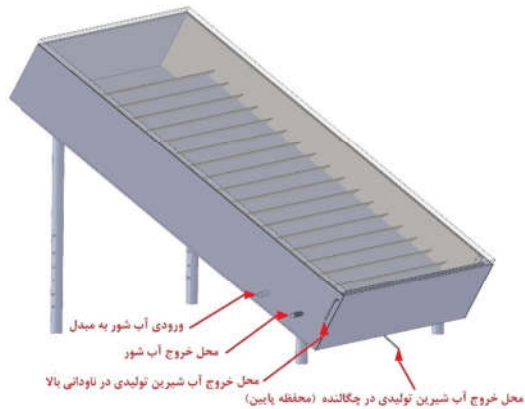
هر چند مطالعات فراوانی در مورد آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای خورشیدی انجام شده است با این وجود تاکنون استفاده از یک چگالنده که به صورت یکپارچه با یک آب شیرین کن‌های حوضچه‌ای شیب‌دار (پله‌ای) ترکیب شده باشد مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این تحقیق، یک آب شیرین کن شیب‌دار جدید و بهبود یافته که از ترکیب یکپارچه یک آب شیرین کن شیب‌دار استاندارد با یک چگالنده به دست آمده، طراحی، ساخته و به صورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است برخلاف تحقیقات پیشین که چگالنده مجزا از آب شیرین کن بود و معمولاً نیاز به فن گردش هوا داشت در تحقیق حاضر اولاً گردش هوا به صورت طبیعی بین چگالنده و ناحیه تبخیر صورت می‌گیرد و دوماً چگالنده فضای جداگانه‌ای نیاز ندارد. به منظور بهبود هر چه بیشتر عملکرد آب شیرین کن جدید یک مبدل نیز به ناحیه چگالنده اضافه شده است که هم به چگالش هر چه بیشتر بخار آب در ناحیه چگالنده کمک می‌کند و هم آب‌شور ورودی را پیش گرم می‌نماید. علاوه بر توجه به اینکه شرایط آب و هوایی هر منطقه شامل میزان تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد اثر قابل توجهی بر عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی دارند، مقایسه دو آب شیرین کن که در دو منطقه مختلف و یا حتی در روزهای متفاوتی از سال مورد آزمایش قرار گرفته‌اند با همدیگر مقایسه درستی نخواهد بود بنابراین برای ارزیابی عملکرد آب شیرین کن جدید، یک دستگاه آب شیرین کن حوضچه‌ای استاندارد با ابعاد، جنس و طراحی یکسان ساخته و همراه آب شیرین کن جدید مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

۲- طراحی و ساخت آبشیرین کن

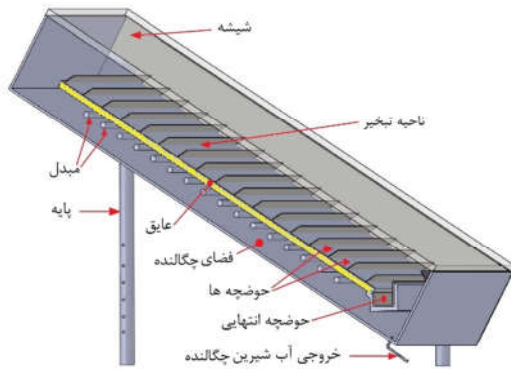
در این بخش مراحل و روش ساخت دستگاه آبشیرین کن خورشیدی جدید شرح داده می‌شود. در شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب نمای کلی و برش طولی آبشیرین کن جدید نشان داده شده است. در شکل ۳ ابعاد قسمت‌های مختلف آبشیرین کن در یک برشی طولی از دستگاه نشان داده شده است. ایده اصلی و جدید در این تحقیق اضافه کردن یک چگالنده به صورت یکپارچه به آبشیرین کن‌های حوضچه‌ای شیب‌دار استاندارد و بررسی اثر آن بر عملکرد آبشیرین کن می‌باشد. آبشیرین کن‌های شیب‌دار استاندارد از یک صفحه جاذب شیب‌دار که حوضچه‌هایی بر روی آن قرار گرفته است تشکیل شده است. پشت این صفحه جاذب عایق بوده و به موازی صفحه جاذب و در فاصله چند سانتیمتری آن یک پوشش شیشه‌ای قرار داشته که با دیوارهای جانبی که در اطراف محیط صفحه جاذب قرار می‌گیرد یک فضای بسته را ایجاد می‌نماید. پوشش شیشه‌ای هم به تابش خورشید اجازه ورود می‌دهد و هم از تلفات حرارتی همرفتی و تابشی جلوگیری می‌کند. در این آبشیرین کن‌ها هم تبخیر آب و هم میعان (تقطیر) آب در این ناحیه بسته صورت می‌گیرد. در آبشیرین کن جدید پیشنهادی در این تحقیق یک فضای جدید در زیر صفحه جاذب و به موازات فضای بین صفحه جاذب و پوشش شیشه‌ای به آبشیرین کن استاندارد اضافه شده است. این فضای جدید به عنوان چگالنده شناخته می‌شود. با این کار هوای اشباع شده در بالای صفحه جاذب (ناحیه و یا فضای تبخیر) به وسیله گردش طبیعی بین منطقه تبخیر و فضای چگالنده که در قسمت زیرین آبشیرین کن تعبیه شده گردش می‌نماید. با توجه به اینکه فضای چگالنده به دلیل اینکه اولاً در معرض تابش خورشید نیست و دوماً از قسمت پایین در معرض هوای بیرون قرار دارد دارای دمای کمتری نسبت به پوشش شیشه‌ای خواهد بود و در نتیجه میعان بخار آب بهتر صورت خواهد پذیرفت. با توجه به ضخامت ورق‌های مورد استفاده، ابعاد کانال‌های ارتباطی و در نظر گرفتن قابلیت جابجایی صفحه جاذب در درون آبشیرین کن، ابعاد بیرونی دستگاه ساخته شده برابر $142\text{cm} \times 54\text{cm}$ در نظر گرفته شد که مساحت بیرونی دستگاه آبشیرین کن برابر $0.7668\text{m}^2 = 7668\text{cm}^2$ می‌باشد. عمق دستگاه‌های آبشیرین کن که شامل چگالنده، صفحه جاذب و قسمت تبخیر می‌شود برابر ۴۴ سانتی‌متر می‌باشد. ارتباط چگالنده با منطقه تبخیر از طریق یک کانال به ابعاد 54×20 سانتی‌متر در بالای صفحه جاذب و یک کانال به ابعاد 54×10 سانتی‌متر در پایین صفحه جاذب برقرار می‌باشد.

یکی از روش‌های افزایش عملکرد آبشیرین کن‌های خورشیدی تقطیری، افزایش نرخ دمای حوضچه‌ها و در نتیجه آن افزایش تبخیر است که این مسئله با افزایش دمای آب ورودی می‌تواند صورت پذیرد. برای دستیابی به این هدف، در آبشیرین کن‌های خورشیدی جدید، ابتدا آب شور که به طور نسبی سردتر از هوای داخل دستگاه است وارد مبدل تعبیه شده در قسمت چگالنده شده و از طریق انتقال حرارت با هوای مرطوب داخل دستگاه در این قسمت هم خود پیش گرم می‌شود و هم با گرفتن حرارت از هوا باعث تقطیر بخار آب موجود در هوای این قسمت دستگاه می‌شود. آب خروجی از مبدل وارد حوضچه (ناودانی) بالای صفحه جاذب می‌شود و از آنجا به صورت مارپیچی بر روی سطح جاذب از درون یک حوضچه وارد حوضچه دیگر می‌شود.

آب در حین عبور گرم شده و قسمتی از آن تبخیر می‌شود. نهایتاً آب شور که قسمتی از آن بخار شد و غلظت نمک آن افزایش یافته است وارد حوضچه جمع‌آوری انتهایی شده و از طریق لوله خروجی از آبشیرین کن خارج می‌شود.



شکل ۱- نمای کلی آبشیرین کن خورشیدی

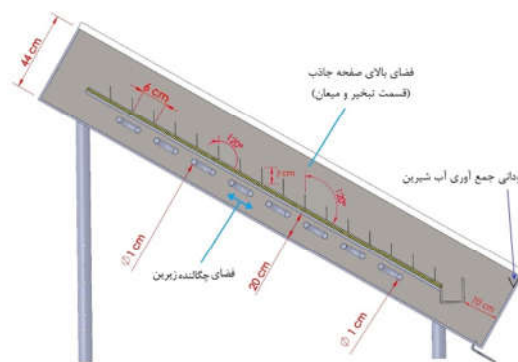


شکل ۲- برش طولی سه بعدی آبشیرین کن بهبود یافته به همراه نام اجزاء و قسمت‌های مختلف آن

برای ساخت صفحه جاذب و ناودانی‌ها از ورق آلومینیزه با ضخامت 0.15 سانتی‌متر ($1/5$ میلی‌متر) استفاده شده است. ناودانی‌ها به صورت مثلثی (مخروطی) و با شیب داخلی 60° درجه به صفحه جاذب وصل شده‌اند (شکل ۳). برای هر دو آبشیرین کن عرض تیغه‌های ناودانی 7 سانتیمتر و فاصله تیغه‌ها از هم 6 سانتیمتر می‌باشد. در آبشیرین کن استاندارد صفحه جاذب تمام کف دستگاه را می‌پوشاند در حالی که در آبشیرین کن بهبود یافته، دو کانال ارتباطی در بالا و پایین دستگاه قرار گرفته است که باعث گردش هوا بین قسمت چگالنده و فضای بالای صفحه جاذب می‌شود؛ بنابراین هر چند ابعاد بیرونی دو دستگاه ساخته شده یکسان می‌باشد ولی ابعاد صفحه جاذب آن‌ها متفاوت می‌باشد. با توجه به این نکته تعداد حوضچه‌ها در آبشیرین کن شیب‌دار استاندارد برابر 16 و در آبشیرین کن بهبود یافته 14 عدد می‌باشد.

از آنجاکه باید تمام انرژی خورشید که به صفحه جاذب می‌رسد برای تبخیر آب به کارگیری شود یک عایق به ضخامت دو سانتی‌متر بین این دو قرار گرفته است تا از انتقال گرما و اتلاف انرژی از صفحه جاذب به چگالنده جلوگیری کند. در زیر عایق یک ورق آلومینیزه به ضخامت 0.07 سانتی‌متر (0.7 میلی‌متر) قرار گرفته است که لوله‌های

مبدل به آن متصل شده‌اند. یک‌فاصله هوایی به‌اندازه ۲۰ سانتیمتر برای چگالنده در نظر گرفته شده است و یک ورق گالوانیزه به ضخامت ۰/۰۰۷ سانتی‌متر به‌عنوان صفحه زیرین قسمت چگالنده قرار داده شده است. قسمت بیرونی چگالنده در معرض هوای محیط بوده و به‌عنوان صفحه تقطیر به کار گرفته می‌شود. مبدل حرارتی از جنس لوله آلومینیومی با قطر یک سانتی‌متر و طول حدود ۷ متر و به‌صورت مارپیچ ساخته شده است. در شکل ۴ عکسی از لوله‌های مبدل حرارتی در فضای چگالنده نشان داده شده است. قوطی‌های مربعی که به‌صورت عمود بر صفحه جاذب در این شکل مشاهده می‌شوند به‌عنوان نگه‌دارنده و ایجادکننده فضای چگالنده می‌باشند و قوطی‌های هم‌راستا با صفحه جاذب نقش ایجادکننده فضای ارتباطی در پایین صفحه جاذب را دارند.



شکل ۳- برش طولی دستگاه آب‌شیرین‌کن کن به همراه ابعاد قسمت‌های مختلف



شکل ۴- عکس مبادله‌کن گرمایی که بر روی صفحه بالایی محفظه چگالنده نصب شده است.

لازم به ذکر است به‌منظور کاهش تلفات حرارتی از صفحه جاذب به ناحیه چگالنده در زیر صفحه جاذب از یک عایق الاستومری به ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده شده و بر روی این عایق نیز یک ورق ۰/۰۱۵ سانتی‌متری (۱/۵ میلی‌متری) قرار گرفته است. مبادله‌کن- گرمایی بر روی این ورق که قسمت بالای ناحیه چگالنده را تشکیل می‌دهد قرار گرفته است. انتقال گرما از صفحه جاذب به آب‌وهوا و تخیر آب باعث می‌شود دمای هوا و میزان رطوبت موجود در هوا افزایش یابد (هوا گرم و مرطوب شود). با توجه به اینکه با افزایش دما چگالی هوا کاهش می‌یابد نیروی بویانسی باعث گردش طبیعی هوا و حرکت هوا از پایین صفحه جاذب به سمت بالا و گردش در ناحیه چگالنده خواهد شد. با توجه به اینکه دمای محیط کمتر از دمای هوای داخل آب‌شیرین‌کن می‌باشد و چون شیشه و چگالنده از طریق

همرفتی با محیط انتقال حرارت انجام می‌دهند انتقال حرارت از طریق شیشه و چگالنده باعث ایجاد پدیده شبنم بر روی شیشه و ناحیه چگالنده شده و بخار آب تقطیر می‌شود. آب تقطیر شده همان آب شیرین بوده که جمع‌آوری و از آب‌شیرین‌کن خارج می‌شود. لازم به ذکر است به‌منظور یکسان بودن عمق دو دستگاه، یک‌فاصله هوایی در قسمت زیرین آب‌شیرین‌کن استاندارد قرار دارد که با استفاده از چسب آکواریوم از قسمت بالای صفحه جاذب جدا و درزبندی شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که مساحت بیرونی و جنس دو دستگاه کاملاً یکسان است هر بهبود عملکردی که در آب‌شیرین‌کن بهبود یافته مشاهده شود ناشی از تغییرات پیشنهادی در این تحقیق خواهد بود.

۲-۱- شرایط و نحوه آزمایش

به‌منظور بررسی عملکرد دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن شیب‌دار بهبود یافته و استاندارد، این دستگاه‌ها به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها در هوای آزاد و در محل دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته (طول جغرافیایی ۵۷/۲۴۷ درجه و عرض جغرافیایی ۳۰/۰۴۷ درجه) که در نزدیکی شهر کرمان قرار دارد انجام شده است. علاوه بر این محل آزمایش به نحوی انتخاب شده است که در طول روز کمترین سایه را داشته باشد. با توجه به اینکه شیب بهینه سالانه برای کلکتورهای خورشیدی برای دریافت بیشترین میزان انرژی خورشیدی، شیب برابر با عرض جغرافیایی می‌باشد و با توجه به عرض جغرافیایی محل آزمایش، آب‌شیرین‌کن‌ها در شیب ثابت ۳۰ درجه و رو به جنوب نصب شده‌اند. این شیب در همه آزمایش‌ها ثابت بوده است. آزمایش‌ها در هر فصل برای دو روز متوالی انجام شده است. هر آزمایش از حدود ساعت ۷ صبح شروع شده است و به مدت ۲۴ ساعت (تا حدود ساعت ۷ صبح روز بعد) ادامه داشته است. لازم به ذکر است شیب صفحه جاذب و زاویه لبه‌های حوضچه‌ها (ناودانی) هم بر اساس این شیب به‌دست آمده است.

۲-۲- تجهیزات آزمایش

جهت اندازه‌گیری تابش کل شامل تابش مستقیم و دیفیوز بر روی سطح کلکتور از پیرانومتر (تابش‌سنج) Kipp & Zonen مدل CMP3 استفاده شده است دقت این پیرانومتر $\pm 1 \text{ W/m}^2$ و عدم قطعیت آن برابر ۲/۲ درصد معادل $11/2 \text{ W/m}^2$ در بیشترین تابش می‌باشد [۲۹]. برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شده است. این ترموکوپل‌ها دارای دقت $\pm 1^\circ\text{C}$ و عدم قطعیت نتایج آن 2°C می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان آب شیرین تولید شده از استوانه مدرج پلاستیکی ۵۰۰ میلی‌متری استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری این استوانه مدرج پنج میلی‌لیتر است و عدم قطعیت نتایج آن ۱۰ میلی‌لیتر برآورد شده است. میزان آب شیرین تولید شده توسط دستگاه‌ها در طول روز هر یک ساعت یکبار اندازه‌گیری می‌شود. برای هرروز میزان کل آب شیرین تولیدی از غروب خورشید تا صبح روز بعد، به‌عنوان تولید شبانه یا تولید شب در آن روز نظر گرفته می‌شود. تجهیزاتی که در این تحقیق از آن‌ها به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای مختلف استفاده شده و میزان دقت آن‌ها در جدول ارائه شده است. در این تحقیق دمای آب درون حوضچه‌ها (T_w) و دمای صفحه



شکل ۵- دستگاه‌های آب شیرین کن شیب دار استاندارد و بهبودیافته در حال آزمایش

۳- نتایج

در این قسمت نتایج به دست آمده در آزمایش‌ها ارائه خواهد شد. پیش از ارائه نتایج، ابتدا چند کمیت که در این قسمت برای نشان دادن وضعیت‌های مختلف دستگاه‌ها و کمیت‌های اندازه‌گیری شده استفاده شده است را توضیح خواهیم داد. اولین کمیت میزان انرژی تابشی روزانه، H ، است که کل انرژی تابشی خورشید که در طول روز به آب شیرین کن می‌رسد را نشان می‌دهد. برای محاسبه این پارامتر از میزان شدت تابش خورشید بر روی شیشه، $I_T(t)$ ، که به وسیله پیرانومتر نصب شده به موازات شیشه به دست آمده است، استفاده می‌شود [۳۰]:

$$H = A_s \times \int I_T(t) dt = A_s \times \sum I_T(t_i) \Delta t \quad (1)$$

که A_s مساحت قسمت دریافت‌کننده تابش یا همان مساحت شیشه می‌باشد و برابر $A_s = 0.767 \text{ m}^2$ می‌باشد و Δt و $I_T(t_i)$ به ترتیب گام زمانی بین دو اندازه‌گیری تابش خورشید و شدت تابش خورشید در زمان t_i می‌باشند.

میزان ساعتی آب شیرین تولیدی با متغیر V_F^h نشان داده می‌شود و برحسب میلی‌لیتر بر ساعت، mL/h بیان می‌شود. میزان آب شیرین تجمعی V_F^{cum} نشان‌دهنده میزان آب شیرین تولیدی از ابتدای اندازه‌گیری تا زمان t می‌باشد. میزان آب شیرین تولیدی کل یا روزانه (روز + شب) با V_F^T نمایش داده می‌شود. بازه نشان‌دهنده نسبت انرژی خروجی مفید به میزان انرژی ورودی به دستگاه می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\eta = \frac{V_F^T \rho h_{fg}}{H} \times 100 \quad (2)$$

که $h_{fg} = 2450 \text{ kJ/kg}$ آنتالپی نهان تبخیر آب و ρ چگالی آب می‌باشد. پارامتر دیگری که برای مقایسه آب شیرین کن استاندارد با آب شیرین کن بهبودیافته مورد استفاده قرار می‌گیرد نسبت عملکرد می‌باشد که به صورت نسبت میزان آب شیرین تولیدی توسط

جاذب (T_{abs}) در سه محل به ترتیب بالا (up)، وسط (mid) و پایین (bot) صفحه جاذب اندازه‌گیری شده‌اند. علاوه بر این دمای پوشش شیشه‌ای (T_{gl}) در وسط شیشه اندازه‌گیری شده است. دماهای قسمت‌های مختلف دستگاه‌های آب شیرین کن به صورت خودکار (اتوماتیک) و با نصب ترموکوپل‌های نوع K در محل موردنظر اندازه‌گیری و ثبت شده است. بدین منظور ترموکوپل‌ها به دستگاه دیتالاگر یونیورسال هیوکی مدل ۸۴۰۱ متصل شده‌اند و دیتالاگر ضمن برداشت پیوسته دماها، هر پنج دقیقه یکبار دمای قسمت‌های مختلف را در فایل خروجی خود ثبت می‌نماید. لازم به ذکر است پیش از نصب ترموکوپل‌ها به آب شیرین کن‌ها، به منظور اطمینان از اندازه‌گیری دقیق دما توسط ترکیب ترموکوپل و دیتالاگر، ترموکوپل‌ها به دیتالاگر متصل شده و سر ترموکوپل در آب در حال جوش قرار داده شده و دمای ثبت شده توسط آن‌ها با دمای جوش محل مقایسه گردید. نتایج این بررسی نشان داد که همه ترموکوپل‌های مورد استفاده در محدوده دقت‌شان دمای جوش آب را به درستی ثبت کرده‌اند.

به منظور بررسی عملکرد دستگاه‌ها در فصول مختلف، آزمایش‌هایی در دو فصل بهار و پاییز انجام شده است. علاوه بر این با توجه به اینکه شرایط آب و هوایی بر عملکرد آب شیرین کن‌ها تأثیر می‌گذارد و به منظور اطمینان از عملکرد دائم آب شیرین کن‌ها عملکرد آب شیرین کن‌ها برای دو روز متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور در فصل بهار آزمایش‌ها در روزهای ۱۱ و ۱۲ خرداد (مطابق با ۱ و ۲ ماه ژوئن میلادی) و در فصل پاییز در روزهای ۱۰ و ۱۱ مهرماه (مطابق با ۱ و ۲ ماه اکتبر میلادی) انجام شده است. در شکل ۵ عکسی از آب شیرین کن‌های شیب دار استاندارد و بهبودیافته در حین آزمایش نشان داده شده است.

جدول ۱- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها و دقت آن‌ها

تجهیز	سازنده و یا مدل	دقت	محدوده عملکرد	عدم قطعیت
ترموکوپل	نوع K	$\pm 1^\circ \text{C}$	-۲۰۰- 135.0°C	۲ $^\circ \text{C}$
پیرانومتر	CMP3 Kipp & Zonen	± 1	۰-۲۰۰۰ W/m^2	۱۱/۲ W/m^2
استوانه مدرج	SIMAX, ۵۰۰ میلی‌لیتر	$\pm 5 \text{ mL}$	۰-۵۰۰ mL	۱۰ mL

دبی حجمی آب شور ورودی به دستگاه‌ها برحسب میلی‌لیتر بر دقیقه، mL/min اندازه‌گیری و بیان می‌شود. میزان پساب خروجی از هر دستگاه برابر دبی آب شور ورودی منهای نرخ آب شیرین تولیدی خواهد بود. دبی حجمی آب شور ورودی در روزهای ۱۱ و ۱۲ خردادماه برابر ۵۰ میلی‌لیتر بر دقیقه و در روزهای ۱۰ و ۱۱ مهرماه برابر ۴۰ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم شده است. با توجه به اینکه از استوانه مدرج برای اندازه‌گیری دبی استفاده شده است میزان دقت اندازه‌گیری دبی حجمی آب شور ورودی ± 5 میلی‌لیتر بر دقیقه و عدم اطمینان آن برابر ۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه برآورد شده است.

آبشیرین کن بهبودیافته به میزان آب شیرین تولیدی توسط آبشیرین کن استاندارد می‌باشد. به صورت ریاضی نسبت عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

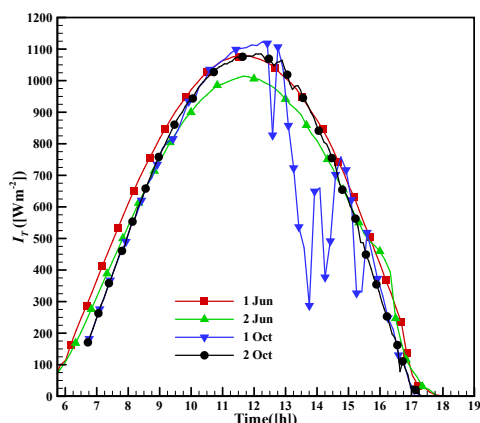
$$RP = \frac{V_F^{T,ISS}}{V_F^{T,SSS}} \quad (3)$$

در معادله فوق، بالانویس‌های ISS^1 و ISS^2 به ترتیب برای نشان دادن آبشیرین کن استاندارد و آبشیرین کن بهبودیافته می‌باشند. با توجه به اینکه آب شور در محل آزمایش در دسترس نبوده است. از آب شبکه لوله‌کشی دانشگاه به عنوان آب شور ورودی استفاده شده است. بدین منظور از یک شیر آب کولر به همراه شلنگ کولری حدود چهار متری برای انتقال آب به هر یک از دستگاه‌های آبشیرین کن استفاده شده است. دمای آب خروجی از شبکه لوله‌کشی دانشگاه در روزهای مختلف اندازه‌گیری شده و بین ۲۸ تا ۳۲ درجه سلسیوس به دست آمده است. در ادامه به بررسی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها پرداخته می‌شود.

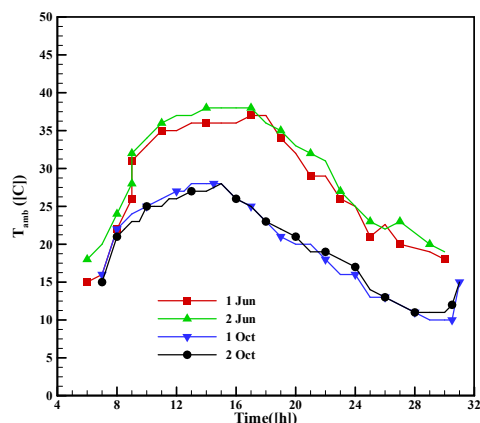
شدت تابش خورشید و دمای محیط برای روزهای آزمایش به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به جز در روز ۱ اکتبر (۱۱ مهر) بقیه روزها آسمان صاف بوده است. علاوه بر این طول روز در روزهای خردادماه بیشتر از طول روز در روزهای ماه پاییز است. لازم به ذکر است در این تحقیق تغییر ساعت تابستانی در زمان‌ها لحاظ نشده است. همچنین این نکته باید تأکید شود که انرژی تابشی خورشید بر روی سطحی موازی با پوشش شیشه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شده است. لازم به ذکر است هرچند در خردادماه میزان انرژی تابشی خورشید بر روی سطح افق بیشتر از مقدار آن در مهرماه است ولی از آنجایی که شیب بهینه ماهیانه در خردادماه و مهرماه به ترتیب برابر صفر درجه و ۴۴ درجه می‌باشد [۳۱] و در مهرماه شیب نصب آبشیرین کن‌ها (۳۰ درجه) به شیب بهینه این ماه (۴۴ درجه) نزدیک‌تر است، همان‌طور که شکل ۷ نیز نشان می‌دهد، میزان انرژی دریافتی در مهرماه و خردادماه تقریباً یکسان است. تغییرات دمای لایه بیرونی شیشه در طول آزمایش‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود دمای شیشه آبشیرین کن استاندارد در طول روز خصوصاً در مواقعی که شدت تابش خورشید قابل توجه است از دمای شیشه آبشیرین کن بهبودیافته بیشتر است. دلیل بالا بودن دمای شیشه در آبشیرین کن این است که هر دو فرآیند تبخیر و میعان در ناحیه بالای صفحه جاذب اتفاق می‌افتد و با توجه به عایق بودن پشت صفحه جاذب همه انتقال گرما باید از طریق شیشه انجام شود در نتیجه دمای شیشه بالاتر خواهد بود.

علاوه بر این شکل ۸ نشان می‌دهد که دمای شیشه تقریباً هم‌فاز با افزایش تابش خورشید افزایش می‌یابد و در حوالی ظهر خورشیدی به بیشینه دمای خود می‌رسد. در بعدازظهر با کاهش شدت تابش انرژی خورشید، دمای شیشه نیز کاهش می‌یابد. بعد از غروب خورشید و در طول شب کاهش دمای محیط سبب می‌شود دمای شیشه نیز بدتبع آن کاهش یابد. نوساناتی که در نمودار دمای شیشه خصوصاً در حوالی ظهر مشاهده می‌شود به دلیل در معرض باد بودن لایه بیرونی

شیشه و ترموکوپل می‌باشد.



شکل ۶- نمودار تغییرات شدت تابش خورشید

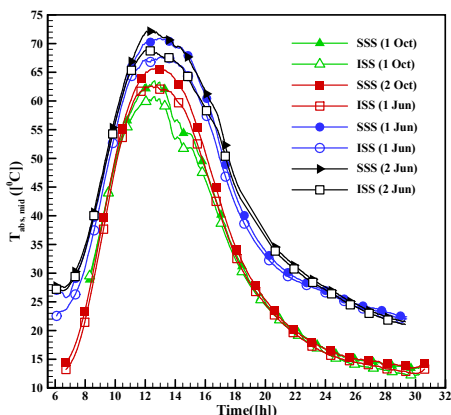


شکل ۷- دمای هوای محیط در روزهای آزمایش

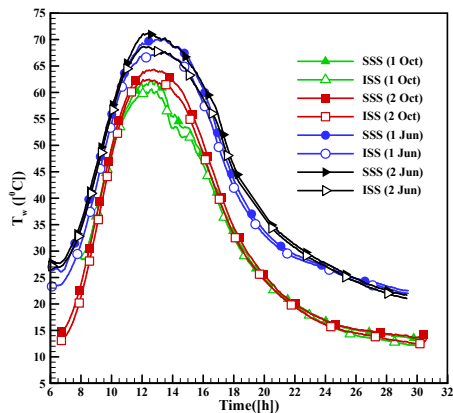
مقایسه بین دمای پایین و وسط صفحه جاذب آبشیرین کن‌های استاندارد و بهبودیافته به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که دمای صفحه جاذب در طول صبح با افزایش تابش افزایش می‌یابد و حدود نیم تا یک ساعت بعد از ظهر خورشیدی، شروع به کاهش می‌کند. با توجه به اینکه در دستگاه آبشیرین کن بهبودیافته مقدار بیشتری از انرژی دریافتی برای تبخیر آب به کار گرفته می‌شود و هوا در قسمت چگالنده هم گردش می‌نماید دمای قسمت‌های مختلف صفحه جاذب در این آبشیرین کن کمتر از دمای صفحه جاذب در آبشیرین کن استاندارد می‌باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود روند تغییرات دمای آب درون حوضچه‌ها شبیه روند تغییرات دمای صفحه جاذب می‌باشد و دمای همه نقاط صفحه جاذب در بالاتر از این دماها در ماه مهر است. دلیل این امر بالاتر بودن دمای محیط در خردادماه می‌باشد. در شکل ۱۱ دمای آب در حوضچه وسط آبشیرین کن استاندارد و بهبودیافته مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود روند تغییرات دمای آب درون حوضچه‌ها شبیه روند تغییرات دمای صفحه جاذب می‌باشد و دمای همه نقاط صفحه جاذب در خردادماه بالاتر از این دماها در ماه مهر است. دلیل این امر بالاتر بودن دمای محیط در خردادماه می‌باشد.

¹ Standard Stepped Solar still (SSS)

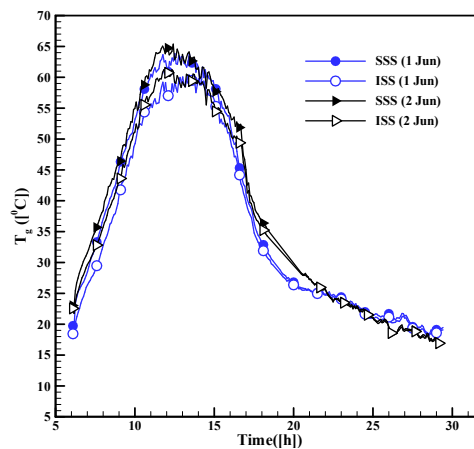
² Improved Stepped Solar still (ISS)



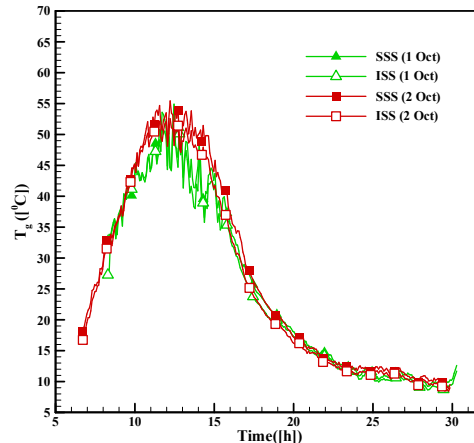
شکل ۱۰- دمای وسط صفحه جاذب آب شیرین کن‌ها



شکل ۱۱- دمای آب در حوضچه میانی آب شیرین کن‌ها



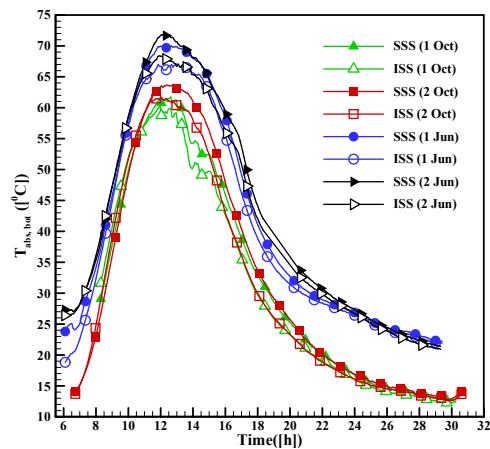
(الف)



(ب)

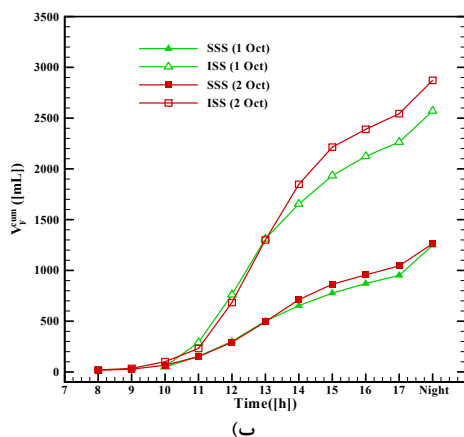
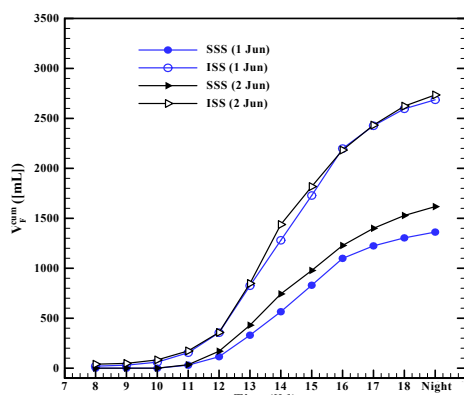
شکل ۸- دمای وسط لایه بیرونی شیشه: الف) خردادماه، ب) مهرماه

مهم‌ترین ویژگی آب شیرین کن‌های خورشیدی میزان آب شیرین تولیدی آن‌ها می‌باشد در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب نرخ ساعتی و میزان تجمعی آب شیرین تولیدی آب شیرین کن بهبودیافته و استاندارد باهم مقایسه شده است. در این نمودارها میزان آب شیرین تولیدی در طول شب در یک نقطه تحت عنوان "Night" نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند میزان آب شیرین تولیدی با تأخیر حدوداً ۱ تا ۲ ساعته با افزایش تابش خورشیدی شروع به افزایش می‌نماید و در روزهای مختلف بین ساعت ۱۳ تا ۱۴ به بیشینه مقدار خود می‌رسد و پس‌از آن شروع به کاهش می‌نماید. دلیل تأخیر در شروع تولید آب شیرین را می‌توان به دلیل نرخ پایین تبخیر در دماهای پایین، بزرگ بودن ظرفیت حرارتی ویژه آب و پایین بودن محتوای بخار آب در هوا در ساعات اولیه روز دانست. علاوه بر این، همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود بسته به نوع دستگاه و روز آزمایش تولید کل آب شیرین در شب در محدوده ۱۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌لیتر می‌باشد. با توجه به عدم وجود انرژی خورشیدی، تولید آب شیرین در طول شب را می‌توان ناشی از دو علت دانست. اولین علت ذخیره قسمتی از انرژی خورشید در صفحه جاذب و آب موجود در آب شیرین کن در طول روز و دومین علت کاهش دمای هوا در طول شب که باعث می‌شود دمای هوای داخل آب شیرین کن کاهش یافته و بخار آب موجود در آن تقطیر گردد. علاوه بر این شکل‌ها به‌وضوح برتری آب شیرین کن بهبودیافته در تمامی روزهای آزمایش بر آب شیرین کن استاندارد را از دیدگاه میزان آب



شکل ۹- دمای پایین صفحه جاذب آب شیرین کن‌ها

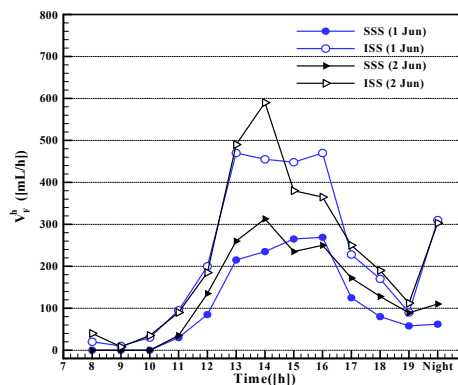
وابسته هستند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در روز ۱۲ خرداد هوا گرم‌تر بوده است به طوری که متوسط دمای محیط ۳۰ درجه سلسیوس می‌باشد در حالی که متوسط دمای محیط در روز ۱۱ مهرماه حدود ۲۰ درجه بوده است. به علت تأثیر این متغیرهای محیطی است که عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها حتی وقتی میزان انرژی تابشی یکسان است در روزهای مختلف متفاوت می‌باشد. با توجه به ابعاد و شیب دستگاه‌ها مساحت تصویر آب‌شیرین‌کن‌ها بر روی سطح افق (فضای اشغال‌شده توسط هر دستگاه) برابر 0.664 m^2 (30°) می‌باشد؛ بنابراین میزان آب شیرین تولیدی بر واحد سطح از تقسیم میزان آب شیرین تولیدی بر 0.664 m^2 به دست می‌آید. بیشینه آب شیرین تولیدی بر واحد سطح در یک روز مقدار 4570 میلی‌لیتر بر مترمربع معادل $4/57$ لیتر بر مترمربع بوده که توسط آب‌شیرین‌کن بهبودیافته تولید شده است.



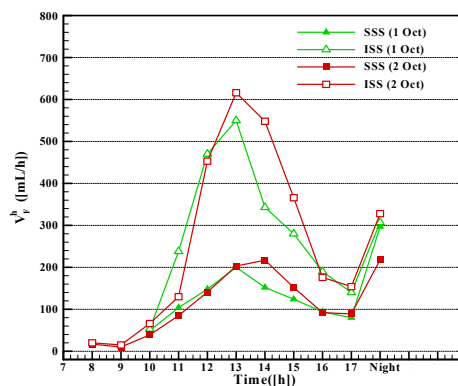
شکل ۱۳- میزان جمعیتی آب شیرین تولیدی آب‌شیرین‌کن‌های استاندارد و بهبودیافته: الف) خردادماه، ب) مهرماه

در جدول ۲ عملکرد آب‌شیرین‌کن پیشنهادی در این تحقیق با چند نمونه مشابه مقایسه شده است. هرچند عملکرد دستگاه پیشنهادی حاضر در مقایسه با دیگر ایده‌ها عملکرد نسبتاً خوبی دارد اما لازم به ذکر است با توجه به اینکه شرایط آب و هوایی (شامل میزان تابش خورشید، دمای محیط، سرعت باد و ...)، شرایط کاری (شامل دبی آب‌شور ورودی، ضخامت شیشه، عمق آب‌شور و ...) و حتی جنس مواد و ابعاد به کاررفته شده جهت ساخت، همگی بر میزان

شیرین تولیدی نشان می‌دهند. همچنین همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد میزان آب شیرین تولیدی آب‌شیرین‌کن بهبودیافته در طول شب بیشتر از مقدار آن برای آب‌شیرین‌کن استاندارد می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل نرخ بیشتر تبخیر آب (در نتیجه تقطیر آب) در ساعات انتهایی روز و حجم بیشتر هوای در گردش در آب‌شیرین‌کن بهبودیافته دانست.



الف)



ب)

شکل ۱۲- نرخ ساعتی آب شیرین تولیدی: الف) خرداد، ب) مهر

خلاصه عملکرد دو دستگاه و شرایط محیطی در این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول بازده دو دستگاه آب‌شیرین‌کن نیز باهم مقایسه شده است. با توجه به عدم قطعیت در تخمین میزان آب شیرین تولیدی و عدم قطعیت در اندازه‌گیری تابش خورشید، محاسبه عدم قطعیت در تخمین بازده (معادله (۲)) نشان می‌دهد که عدم قطعیت بازده برابر حدود ۱ درصد می‌باشد. همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد در همه آزمایش‌ها آب‌شیرین‌کن بهبودیافته عملکرد بسیار بهتری نسبت به آب‌شیرین‌کن استاندارد دارد. به طوری که در بسیاری از روزها بیشتر از دو برابر دستگاه استاندارد آب شیرین تولید کرده است. علاوه بر این، این جدول نشان می‌دهد که با وجود اینکه میزان انرژی تابشی رسیده به آب‌شیرین‌کن‌ها در روزهای ۱۲ خرداد و روز ۱۱ مهر تقریباً یکسان است ولی میزان آب شیرین تولیدی در روز ۱۲ خرداد به طور قابل توجهی بیشتر از روز ۱۱ مهرماه می‌باشد. این رفتار به این دلیل است که میزان آب شیرین تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن‌ها علاوه بر میزان انرژی تابشی رسیده به آن‌ها به متغیرهای محیطی و جوی دیگر نظیر دما و سرعت باد و ...

۵- تقدیر و تشکر

به این وسیله از حمایت مالی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته با شماره قرارداد ۹۷/۱۵۶۴ تقدیر و تشکر می‌گردد.

جدول ۲- عملکرد آب شیرین پیشنهادی در این تحقیق و چند نمونه

نویسنده (گان)	توضیحات
عبدالله	ویژگی: اتصال آب شیرین کن شیب‌دار به هوا گرم‌کن خورشیدی میزان محصول (mL/m²/day): ۶۳۰۰ بازده: ۵۲٪ (بدون لحاظ کردن مساحت هواگرمکن و انرژی دریافت شده توسط آن)
گاوند و بویار [۳۲]	ویژگی: بررسی اثر انحنای کف حوضچه‌های صفحه جاذب میزان محصول (mL/m²/day): ۲۶۷۰ بازده: - (ذکر نشده است)
عیسی و همکاران [۳۳]	ویژگی: بررسی تأثیر نوع برآمدگی صفحه جاذب، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده همراه مواد نانو، فتیله و چگالنده خارجی همراه با فن میزان محصول (mL/m²/day): ۷۰۰۰ (آب شیرین کن شیب‌دار بهبودیافته در مقایسه با آب شیرین کن حوضچه‌ای ساده (غیر شیب‌دار) ۱۷۰ درصد بیشتر آب شیرین تولید کرده است. بازده: ۵۹٪ (بازده آب شیرین کن ساده برابر ۳۵٪)
کابیل و همکاران [۱۰]	ویژگی: بررسی اثر عرض حوضچه‌ها، استفاده از گردآور خورشیدی برای پیش‌گرمایش آب ورودی، استفاده از فتیله میزان محصول (mL/m²/day): ۶۰۸۰ (آب شیرین کن شیب‌دار بهبودیافته در مقایسه با آب شیرین کن حوضچه‌ای ساده ۶۷ درصد بیشتر آب شیرین تولید کرده است. بازده: ۳۴٪ (حالت بدون فتیله و با آبگرم کن خورشیدی)
ابوجازر و همکاران [۳۴، ۱۳]	ویژگی: استفاده از صفحه جاذب از جنس مس میزان محصول (mL/m²/day): ۴۳۸۳ بازده: ۲۹/۸٪
ادیبی و طوسی و همکاران [۳۵]	ویژگی: استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و چگالنده خارجی همراه با برج خنک‌کن میزان محصول (mL/m²/day): ۳۶۲۰ بازده: ۵۶/۶٪ (بر اساس مساحت سطح افقی آب شیرین کن و بدون لحاظ کردن مساحت اختصاص داده شده به چگالنده و برج خنک‌کن)
مطالعه حاضر	ویژگی: اضافه کردن چگالنده به صورت یکپارچه به آب شیرین کن شیب‌دار میزان محصول (mL/m²/day): ۴۵۷۰ بازده: ۳۵/۹٪ (بازده آب شیرین کن شیب‌دار استاندارد برابر ۲۰/۴٪)

۶- مراجع

- [1] Qiblawey H. M., Banat F., Solar thermal desalination technologies, *Desalination*, Vol. 220, No. 1-3, pp. 633-644, 2008
- [2] Shoeibi S., Rahbar N., Abedini Esfahlani A. and Kargarsharifabad H., A comprehensive review of Enviro-Exergo-economic analysis of solar stills, *Renewable and*

آب شیرین تولیدی بر واحد سطح و بازده تأثیر دارند مقایسه آب شیرین کن‌هایی که در مکان‌های مختلف و توسط محققین مختلف ساخته شده‌اند مقایسه‌ای کامل و دقیق نخواهد بود و نمی‌تواند برتری یک طرح را بر یک طرح دیگر اثبات نماید. بهترین و دقیق‌ترین مقایسه بین عملکرد دو ایده و طرح برای آب شیرین کن‌ها، ساخت آن‌ها با مواد، ابعاد و شرایط کاملاً یکسان و مقایسه عملکرد آن‌ها در یک مکان و زمان مشخص است. این همان کاری که در این تحقیق انجام شده است و عملکرد آب شیرین کن شیب‌دار استاندارد با آب شیرین کن شیب‌دار بهبودیافته مقایسه شده است.

جدول ۱- خلاصه شرایط محیطی و عملکرد دستگاه‌های آب شیرین کن در روزهای آزمایش

روز آزمایش	H (MJ)	نوع دستگاه	V_F^T (mL)	η (%)	RP
۱۱ خرداد	۲۲,۳۴	استاندارد	۱۴۲۵	۱۵,۶	۲,۱۰
		بهبودیافته	۲۹۹۵	۳۲,۹	
۱۲ خرداد	۲۰,۷۵	استاندارد	۱۷۳۰	۲۰,۴	۱,۷۶
		بهبودیافته	۳۰۴۰	۳۵,۹	
۱۰ مهر	۱۹,۲	استاندارد	۱۲۵۰	۱۵,۹	۲,۰۶
		بهبودیافته	۲۵۷۰	۳۲,۸	
۱۱ مهر	۲۰,۵	استاندارد	۱۲۶۵	۱۵,۱	۲,۲۷
		بهبودیافته	۲۸۷۰	۳۴,۳	

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ایده یک دستگاه آب شیرین کن جدید با عنوان آب شیرین کن شیب‌دار بهبودیافته برای شیرین‌سازی آب‌های شور با استفاده از انرژی خورشیدی ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد آب شیرین کن جدید، یک آب شیرین کن استاندارد نیز با همان مشخصات و ابعاد ساخته شد. آب شیرین کن‌های ساخته شده در فصل‌های بهار و پاییز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده نشان داد که آب شیرین کن بهبودیافته قادر است تا بیش از دو برابر آب شیرین کن استاندارد آب شیرین تولید کند. مقایسه بازده دستگاه آب شیرین کن بهبودیافته با دستگاه آب شیرین کن استاندارد نشان می‌دهد که بازده آب شیرین کن استاندارد در محدوده ۱۳ تا ۱۶ درصد می‌باشد در حالی که بازده آب شیرین کن بهبودیافته بین ۲۹ تا ۳۶ درصد می‌باشد که به وضوح عملکرد بهتر آب شیرین پیشنهادی در این تحقیق را نشان می‌دهد. بیشینه میزان آب شیرین تولیدی این دستگاه برحسب مترمربع مساحت آب شیرین کن برابر ۴/۵۷ لیتر بر مترمربع لیتر بر روز می‌باشد. علاوه بر این بررسی دمای قسمت‌های مختلف آب شیرین کن بهبودیافته و آب شیرین کن استاندارد نشان داد که دمای آب درون حوضچه‌ها و دمای صفحه جاذب و دمای شیشه در آب شیرین کن بهبودیافته در حدود ۵-۰ درجه سلسیوس کمتر از دمای آب شیرین کن استاندارد می‌باشد.

- [21] Al-Hamadani A. A. F., Shukla S. K., Performance of Single Slope Solar Still with Solar Protected Condenser, *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 6-28, 2013/04/01 2013
- [22] Bhardwaj R., ten Kortenaar M. V. and Mudde R. F., Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation, *Applied Energy*, Vol. 154, pp. 480-490, 2015/09/15/ 2015
- [23] Fath H. E. S., Elsherbiny S. and Ghazy A., 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
- [24] Esfahani J. A., Rahbar N. and Lavvaf M., Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still—an experimental study on winter days, *Desalination*, Vol. 269, No. 1-3, pp. 198-205, 2011
- [25] Shahraki Shahdabadi R., Mortazavi A., Lotfi P. and Shakib S. E., An experimental study of feedwater flow rate effects on technical and economic performances of a stepped solar still, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, No. 8, p. 372, 2021/07/06 2021
- [۲۶] گشایشی ح.، ادیبی طوسی س. س.، بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با کندانسور خارجی و منبع ذخیره انرژی گرمای، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۰، ش ۳، ص. ۱۹۵-۲۰۳، ۱۳۹۹.
- [۲۷] گشایشی ح.، ادیبی طوسی س. س.، رستمی م. و جعفری ا.، بررسی آزمایشگاهی اثر شیب پوشش شیشه ای با سطوح تخت و محدب صفحه جاذب در بازدهی آب شیرین کن خورشیدی، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۱، ش ۱، ص ۱۹۹-۲۰۷، ۱۴۰۰.
- [28] Shoeibi S., Rahbar N., Abedini Esfahlani A. and Kargarsharifabad H., A review of techniques for simultaneous enhancement of evaporation and condensation rates in solar stills, *Solar Energy*, Vol. 225, pp. 666-693, 2021/09/01/ 2021
- [29] Konings J., Habte A., "Uncertainty evaluation of measurements with pyranometers and pyrhemometers," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2016.
- [30] Duffie J. A., Beckman W. A., *Solar engineering of thermal processes*, Fourth Edition ed. John Wiley & Sons, 2013.
- [31] Jafari S., Javaran E. J., An optimum slope angle for solar collector systems in kerman using a new model for diffuse solar radiation, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 34, No. 9, pp. 799-809, 2012
- [32] Gawande J. S., Bhuyar L. B., Effect of Shape of the Absorber Surface on the Performance of Stepped Type Solar Still, *Energy and Power Engineering*, vol. Vol.05No.08, p. 9, 2013
- [33] Essa F. A. et al., Augmenting the productivity of stepped distiller by corrugated and curved liners, CuO/paraffin wax, wick, and vapor suctioning, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 28, No. 40, pp. 56955-56965, 2021/10/01 2021
- [34] Abujazar M. S. S., Fatihah S., Lotfy E. R., Kabeel A. E. and Sharil S., Performance evaluation of inclined copper-stepped solar still in a wet tropical climate, *Desalination*, Vol. 425, pp. 94-103, 2018/01/01/ 2018
- [35] Adibi Toosi S. S., Goshayeshi H. R. and Zeinali Heris S., Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser, *Journal of Energy Storage*, Vol. 40, p. 102681, 2021/08/01/ 2021
- Sustainable Energy Reviews*, Vol. 149, pp. 111404, 2021/10/01/ 2021
- [3] Kalidasa Murugavel K., Chockalingam K. K. S. K. and Srithar K., Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still, *Desalination*, Vol. 220, No. 1-3, pp. 677-686, 2008
- [4] Sampathkumar K., Arjunan T. V., Pitchandi P. and Senthilkumar P., Active solar distillation-A detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 6, pp. 1503-1526, 2010
- [5] Rajaseenivasan T., Murugavel K. K., Elango T. and Hansen R. S., A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 17, pp. 248-259, 2013
- [6] Muthu Manokar A., Kalidasa Murugavel K. and Esakkimuthu G., Different parameters affecting the rate of evaporation and condensation on passive solar still - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, pp. 309-322, 2014
- [7] Kaushal A., Varshney R. and Verma A., A Review on Different Design of Solar Stills, 2017
- [8] Srithar K., Rajaseenivasan T., Recent fresh water augmentation techniques in solar still and HDH desalination—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 629-644, 2018
- [9] Velmurugan V., Kumaran S. S., Prabhu N. V. and Srithar K., Productivity enhancement of stepped solar still: Performance analysis, *Thermal Science*, Vol. 12, No. 3, pp. 153-163, 2008
- [10] Kabeel A., Khalil A., Omara Z. and Younes M., Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still, *Desalination*, Vol. 289, pp. 12-20, 2012
- [11] Gawande J. S., Bhuyar L. B. and Deshmukh S. J., Effect of depth of water on the performance of stepped type solar still, *International Journal of Energy Engineering*, Vol. 3, No. 4, p. 137, 2013
- [12] Bouzaid M., Oubrek M., Ansari O., Sabri A. and Taha-Janani M., Mathematical Analysis of a New Design for Cascade Solar Still, 2016
- [13] Abujazar M. S. S., Fatihah S. and Kabeel A. E., Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate, *Desalination*, Vol. 423, No. Supplement C, pp. 141-148, 2017/12/01/ 2017
- [14] Kabeel A., Omara Z. and Younes M., Techniques used to improve the performance of the stepped solar still—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 46, pp. 178-188, 2015
- [۱۵] باقری اسفند ح.، رستم زاده ر. و رستم زاده م.، بررسی سیستم‌های مختلف آب شیرین کن خورشیدی، مجله علمی مهندسی مکانیک، د. ۲۸، ش ۱، ۱۳۹۸.
- [16] Fath H. E. S., Hosny H. M., Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser, *Desalination*, Vol. 142, No. 1, pp. 19-27, 2002/01/20/ 2002
- [17] Belhadj M. M., Bouguettaia H., Marif Y. and Zerrouki M., Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria, *Energy Conversion and Management*, Vol. 94, pp. 245-252, 2015/04/01/ 2015
- [18] Fatani A. A., Zaki G. M. and Al-Turki A., Improving the yield of simple basin solar stills as assisted by passively cooled condensers, *Renewable Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 377-386, 1994/06/01/ 1994
- [19] Kabeel A. E., Omara Z. M., Essa F. A. and Abdullah A. S., Solar still with condenser – A detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, pp. 839-857, 2016/06/01/ 2016
- [20] Madhlopa A., Johnstone C., Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 7, pp. 1668-1677, 2009/07/01/ 2009