

# ارزیابی عملکرد سامانه ترکیبی آب گرم کن / آب شیرین کن خورشیدی خانگی

محمد ضامن\*<sup>+</sup>، ناصر رضاخانی، مهدیه رجبی، میرعلی اصغر زینالی دانالو

کرج، مجتمع تحقیقاتی جهاد دانشگاهی، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران

**چکیده:** استفاده از آب شیرین کن ها یکی از راه حل های مقابله با بحران آب در کشور می باشد. روش رطوبت زنی - رطوبت زدایی هوا یا به اختصار HD یکی از روش های نمک زدایی از آب های شور در ظرفیت های پایین است که طی سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله طرحی برای ترکیب آب شیرین کن HD خورشیدی با آب گرم کن خورشیدی خانگی ارائه شده است. این دستگاه در مقیاس خانگی و برای تأمین همزمان آب شرب و آب گرم مصرفی یک خانوار طراحی شده و برای مناطق دورافتاده و کم جمعیت کویری گزینه ای مناسب می باشد. پس از بررسی ترکیب های گوناگون این دو دستگاه و انتخاب و ارزیابی فرایند نهایی، ساخت دستگاه ترکیبی در پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران انجام شد و آزمایش های لازم بر روی آن صورت گرفت. پارامترهای گوناگون و مؤثر در عملکرد دستگاه مانند شدت جریان ورودی به کندانسور، محدوده دمایی عملکرد آب شیرین کن و میزان تابش دریافتی خورشید مورد بررسی قرار گرفت. این دستگاه با توجه به شرایط تابش خورشید در کرج در ماه های بهار و تابستان مورد ارزیابی قرار گرفت که بر این اساس با استفاده از ۴ عدد کلکتور خورشیدی می تواند روزانه تا ۲۰ لیتر آب شیرین و حدود ۲۵۰ لیتر آب گرم تولید کند. با توجه به اینکه در فرایند طراحی شده آب شور خروجی از آب شیرین کن به عنوان آب گرم مصرفی مورد استفاده قرار می گیرد، در نتیجه میزان استفاده از آب گرم توسط مصرف کننده دورریز آب دستگاه کاهش می یابد که بر اساس طراحی صورت گرفته می تواند در برخی روزها به صفر برسد. بنابراین افزون بر به کارگیری انرژی خورشید در تأمین گرمای مورد نیاز، صرفه جویی مناسبی در مصرف آب صورت می گیرد.

**واژه های کلیدی:** آب شیرین کن؛ آب گرم کن؛ انرژی خورشیدی؛ رطوبت زنی؛ رطوبت زدایی

**KEY WORDS:** Desalination unit; Water heater; Solar energy; Humidification; Dehumidification.

## مقدمه

از نوع مستقیم بوده اند و پژوهش های فراوانی در بهبود کارایی آن ها صورت گرفته است، با این حال به دلیل مشکل هایی مانند کدر شدن پوشش شفاف و کاهش راندمان دستگاه به صورت

پژوهش های صورت گرفته در زمینه آب شیرین کن های خورشیدی به دو روش استفاده مستقیم و غیر مستقیم از انرژی خورشید دسته بندی می شود. با وجود آنکه نخستین آب شیرین کن های خورشیدی

+E-mail: zamen@shahroodut.ac.ir

\*عده دار مکاتبات

● نشانی دیگر: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی مکانیک

و در ابتدا یک دستگاه آب شیرین کن به ظرفیت ۱۰ لیتر بر ساعت در پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران ساخته شد [۸]. سپس طراحی و ساخت آب شیرین کن - آب گرم کن خورشیدی HD دومرحله ای برای یک روستا در استان قم با استفاده از فرایند دو مرحله‌ای توسط همان تیم پژوهشی انجام شد که میزان مصرف انرژی آن نسبت به نمونه پیشین حدود ۲۰٪ کاهش یافت [۹]. تاکنون اصلاح فرایند ترکیبی آب گرم کن و آب شیرین کن خورشیدی HD به عنوان یک فرآورده‌ی تجاری و متناسب با نیاز مصرف کننده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، طرح ترکیبی برای یک دستگاه آب گرم کن/آب شیرین کن خورشیدی غیرمستقیم (که مبتنی بر فرایند رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی هوا) می‌باشد در مقیاس خانگی بررسی و ارزیابی شده و نتیجه‌های طراحی، ساخت و تست دستگاه ارایه شده است.

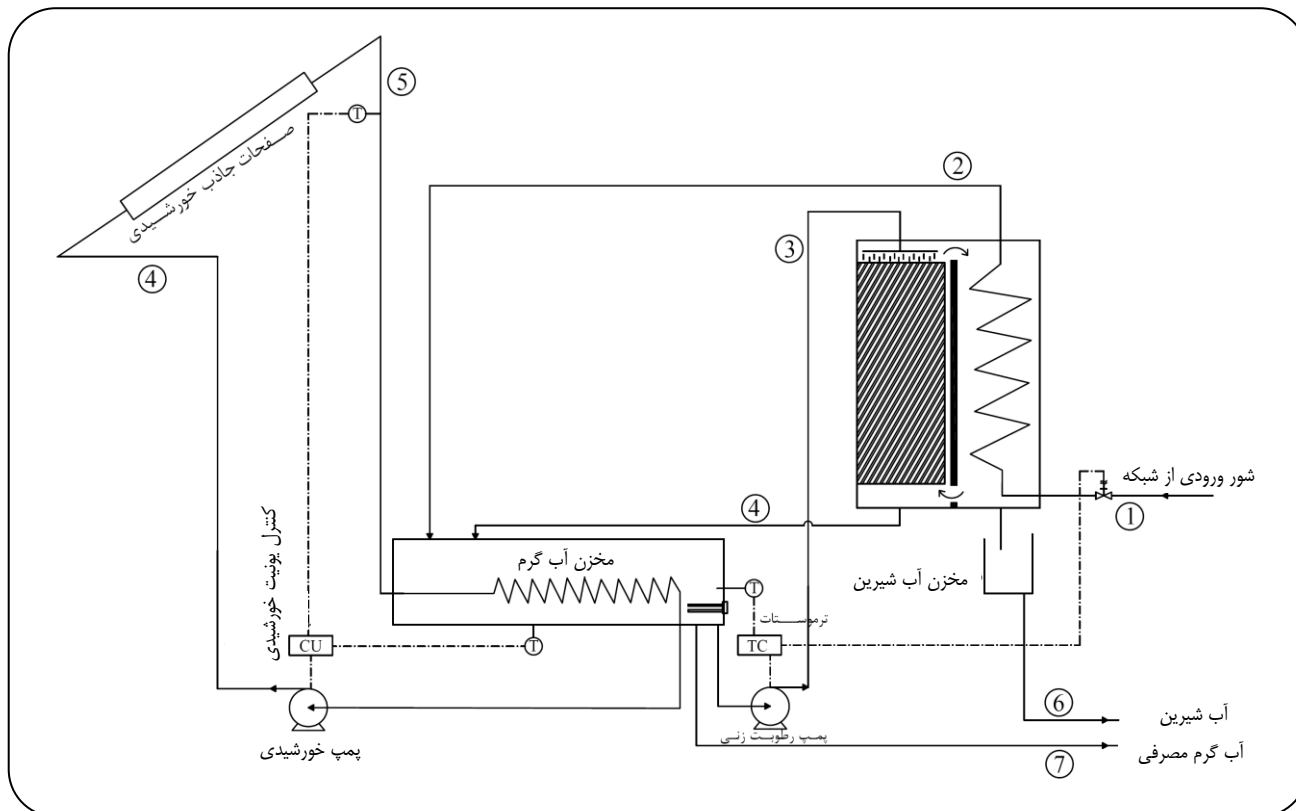
## بخش تجربی

### تشریح فرایند

پس از بررسی ۱۱ حالت گوناگون ترکیب آب شیرین کن HD با آبگرمکن خورشیدی [۱۰]، فرایندی مطابق شکل ۱ به عنوان نمودار جریانی نهایی برای دستگاه ترکیبی انتخاب شد. مطابق شکل، دستگاه از بخش‌های گوناگون شامل آب شیرین کن، مخزن آب گرم، مخزن آب شیرین، کلکتورهای خورشیدی، پمپ‌ها و سامانه کنترلی تشکیل شده است. در آب شیرین کن از فرایند رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی هوا استفاده شده است. این دو فرایند درون یک محفظه بسته و به صورت پیوسته انجام می‌گیرد. رطوبت‌زنی هوا با استفاده جریان مخالف آب شور و هوا بر روی نوعی آکنه پلیمری مقاوم به دمای بالا رخ می‌دهد که منجر به افزایش دما و رطوبت هوا می‌شود. ظرفیت جذب رطوبت هوا با افزایش دما به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد، به‌عنوان نمونه اختلاف رطوبت مطلق حالت اشباع هوا بین دو دمای ۳۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس بیش از ۲۵۰ گرم بر کیلوگرم هوای خشک است. با تبخیر مولکول‌های آب، املاح باقیمانده همراه با جریان خروجی آب شور (جریان ۴ در شکل ۱) دفع می‌شود. هوای گرم و مرطوب از قسمت بالای آکنه خارج شده و به بخش رطوبت‌زدایی وارد می‌شود. در بخش رطوبت‌زدایی از یک چگالنده پره‌لوله برای خنک نمودن جریان هوا و رطوبت‌زدایی آن استفاده شده است. در این چگالنده مطابق شکل ۱ از آب سرد ورودی به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود که منجر به پیش گرم شدن

تجاری درنیامده است. اما روش غیر مستقیم که از فناوری‌های متداول جمع‌آوری انرژی خورشیدی مانند کلکتورهای خورشیدی استفاده می‌نماید و سپس این انرژی را در آب شیرین کن مورد استفاده قرار می‌دهد، به طور کلی دارای راندمان بالاتری از روش مستقیم بوده و به دلیل تماس نداشتن آب شور با جاذب خورشیدی، بسیاری از مشکل‌های بهره‌برداری آن را نیز ندارد. روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی هوا (HD) از جمله روش‌های غیرمستقیم در آب شیرین کن‌های خورشیدی بوده که در سال‌های اخیر نیز مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از سال ۱۹۹۰ میلادی، چندین آب شیرین کن HD در کشورهای تونس، مالزی و اردن ساخته شده است. از پژوهش‌های مهم در زمینه این نوع آب شیرین کن‌ها مطالعه‌ها و پژوهش‌هایی است که توسط *Ben Bacha* و همکاران [۱] در کشور تونس انجام شده است. آن‌ها واحد خود را با نام SMCEC<sup>(۱)</sup> ارایه نمودند و پس از بررسی دو واحد نصب شده در سال ۱۹۹۷ میلادی [۲] یک واحد تحقیقاتی کوچک‌تر با  $7/2 \text{ m}^2$  کلکتور خورشیدی تخت ساختند. بیش‌تر پژوهش‌های *Ben Bacha* بر روی مدل‌سازی و شبیه‌سازی واحد [۱] و سپس در سال‌های بعد مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی با وارد نمودن پارامتر زمان در محاسبه‌ها [۳] بوده است. وی به این روش کارکرد واحد در ساعت‌های گوناگون روز را مورد بررسی قرار داده و در مقاله‌ای دیگر نیز عملکرد کلکتورهای خورشیدی را با توجه به متغیر بودن نسبت به زمان مورد توجه قرار داد. *Ben Bacha* تلاش نموده است تا با شبیه‌سازی در شرایط گوناگون، عملکرد و راندمان واحد را بهبود دهد [۴]. در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های زیادی در جهت ساخت آب شیرین کن خورشیدی HD صورت گرفته است. *Zehui Chang* و همکاران [۵] به تحلیل تجربی آب شیرین کن چند منظوره خورشیدی بر پایه فرایند HD پرداخته‌اند. در سال ۲۰۱۳ *A.E Kabeel* و همکاران [۶] نمونه آزمایشگاهی از یک سامانه آب شیرین کن خورشیدی HD و یک واحد تبخیر یک مرحله‌ای ترکیب شده با آب گرم کن خورشیدی نانو سیال را مورد بررسی قرار داده‌اند. *Gufeng Yuana* و همکاران [۷] به بررسی نتیجه‌های به دست آمده از یک سامانه آب شیرین کن HD با ظرفیت تولید ۱۰۰۰ لیتر آب شیرین در روز پرداخته‌اند. این دستگاه متشکل از بخش گرم کننده هوا با سطح ۱۰۰ متر مربع و کلکتورهای خورشیدی با سطح ۱۲ متر مربع می‌باشد. در ایران پژوهش‌هایی از سال ۱۳۸۵ در زمینه روش HD آغاز شد

(۱) Solar Multiple Condensation Evaporation Cycle



شکل ۱- نمودار جریان‌ی دستگاه ترکیبی آب گرم کن/آب شیرین کن خورشیدی.

جریان می‌یابد. با توجه به سطح انتقال حرارت چگالنده و جریان طبیعی هوا درون محفظه آب شیرین کن، دمای آب شور خروجی چگالنده تا حدود ۶۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. آب پیش گرم شده در چگالنده به حجم آب داخل مخزن افزوده شده و سپس در طول شبانه روز به عنوان آب گرم بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی به گونه‌ای انجام شده است که شدت جریان آب سرد ورودی با میزان آب گرم مصرفی هماهنگی داشته باشد تا از هدر رفت آب در دستگاه جلوگیری شود. آب گرم خروجی از آکنه (جریان شماره ۴) نیز که دمایی در بازه ۵۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس دارد، پس از خروج از بخش رطوبت‌زنی وارد مخزن آب گرم می‌شود.

با توجه به شدت تابش خورشید و میزان مصرف انرژی در آب شیرین کن دمای مخزن تغییر می‌کند. چنانچه شدت تابش برای جبران انرژی مصرفی در آب شیرین کن کافی نباشد دمای مخزن کاهش می‌یابد و با توجه به تنظیمات سامانه کنترلی در دمای مشخصی دستگاه خاموش می‌شود. آب گرم مخزن و

آب ورودی نیز می‌شود. آب پیش گرم شده پس از خروج از چگالنده به مخزن آب گرم وارد می‌شود. هوای مرطوب با عبور از سطح خارجی چگالنده خنک شده و رطوبت اضافی هوا به قطره‌های شبنم بر روی سطح چگالنده تبدیل می‌شود. و در بخش پایین رطوبت‌زدایی به عنوان آب شیرین جمع‌آوری می‌شود. مطابق شکل ۱ کلکتورهای خورشیدی انرژی دریافتی از خورشید را با استفاده از یک مبدل حرارتی به آب درون مخزن منتقل می‌نماید. سامانه کنترلی به گونه‌ای طراحی شده است که با اندازه‌گیری دمای سطح کلکتور و درون مخزن، چنانچه پتانسیل افزایش دمای مخزن توسط کلکتورهای خورشیدی وجود داشته باشد، فرمان روشن شدن پمپ خورشیدی را صادر می‌نماید (جریان‌های ۵ و ۶ در شکل ۱ نشان دهنده سیال در گردش درون کلکتورها است). با افزایش دمای مخزن و رسیدن به دمای ۷۰ درجه سلسیوس [۱۱]، با فرمان سامانه کنترلی آب شیرین کن شروع به کار نموده و پمپ رطوبت‌زنی مربوط به گردش آب بر روی آکنه روشن شده و با استفاده از یک شیر کنترلی قطع/ وصل<sup>(۱)</sup> آب سرد نیز درون چگالنده

(1) on/off



شکل ۲- تصویری از دستگاه ترکیبی آب گرم کن/آب شیرین کن خورشیدی.

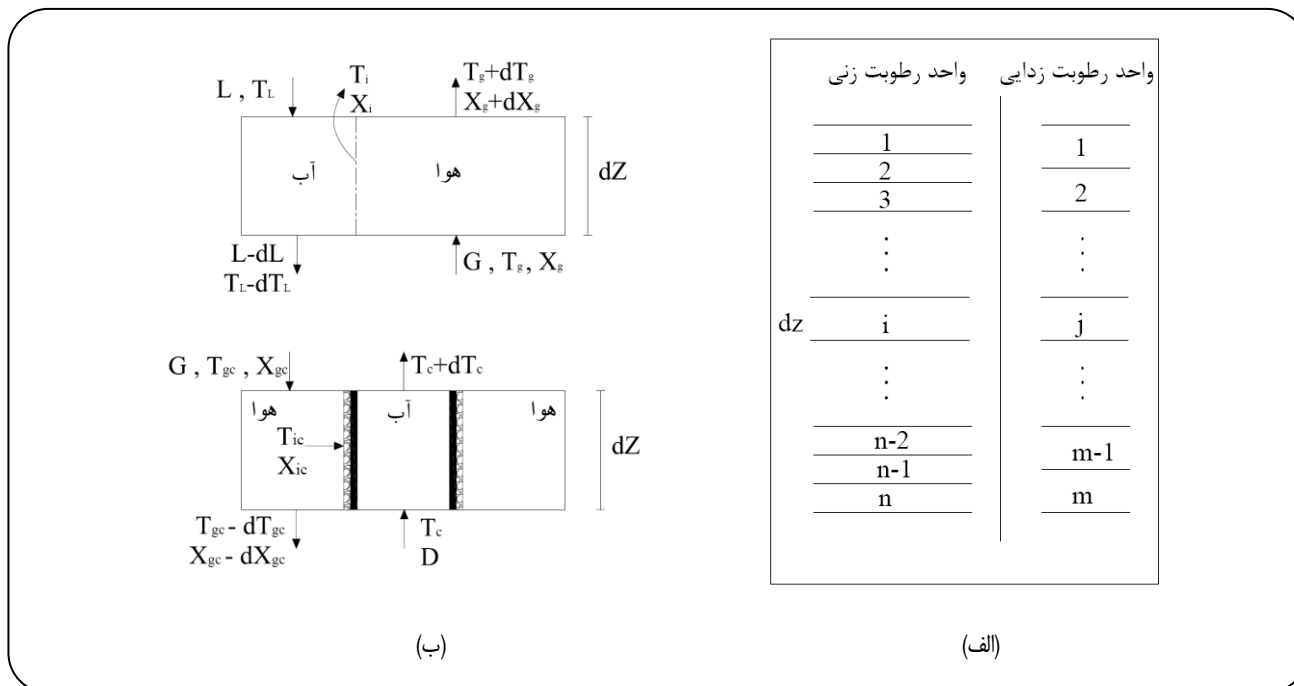
آب گرم طراحی و ساخته شد (شکل ۲) که این ظرفیت پاسخگویی نیاز یک خانوار ۴ نفره می‌باشد. کلیه تجهیزهای آب شیرین کن و آب گرم کن زیر یکی از صفحه‌های جاذب خورشیدی جانمایی شد. در آب شیرین کن از آکنه‌ای پلیمری از جنس پلی پروپیلن با سطح ویژه ۲۴۰ مترمربع بر متر مکعب استفاده شد. در چگالنده نیز از یک مبدل پرلوله با لوله‌های مسی و پره‌های آلومینیومی و با سطح ویژه ۱۵۰ مترمربع بر متر مکعب استفاده شد. مخزن آب گرم با حجم مخزن ۳۸۰ لیتر به صورت دوجداره ساخته شد که لایه داخلی از ورق استیل و ورق خارجی از جنس آهنی روکش دار می‌باشد. طراحی مخزن و جریان‌های ورودی و خروجی از آن به گونه‌ای انجام شد که جریان‌های ورودی با دمایی پایین تر از یک سمت مخزن وارد شده و جریان گرم خروجی از سمت دیگر خارج شوند. بدین ترتیب از اختلاط مستقیم آب با دماهای متفاوت جلوگیری می‌شود.

در این دستگاه از چهار عدد کلکتور خورشیدی به مساحت تقریبی ۸ متر مربع برای تأمین گرمای مورد نیاز آب گرم و دمایی راه‌اندازی آب شیرین کن استفاده شد. البته برای مناطق کویری می‌توان از ۳ عدد کلکتور استفاده نمود. پس از ساخت دستگاه مطابق شکل ۲ در محل پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران در اطراف شهر کرج، آزمایش‌هایی در شرایط گوناگون کاری و آب و هوایی انجام شد تا با توجه

آب شیرین تولید شده که درون مخزن کوچک‌تری جمع‌آوری شد با استفاده از لوله‌های خروجی در اختیار مصرف کننده قرار می‌گیرد. یکی دیگر از نکته‌های شایان توجه در فرایند ترکیبی جدید این است که در این طراحی شدت جریان آب در گردش بر روی آکنه به صورت مستقل از شدت جریان چگالنده است در نتیجه می‌توان با افزایش آن میزان تبخیر را افزایش داد. بدین ترتیب انعطاف‌پذیری بالاتری در طراحی فرایند و انتخاب شدت جریان دو جریان اصلی وجود خواهد داشت. از آنجاکه آب گرم تولید شده در دستگاه ناشی از جریان پیش گرم شده درون چگالنده و جریان در گردش روی آکنه است، این آب زمانی می‌تواند به عنوان آب بهداشتی مورد استفاده قرار گیرد که آب ورودی نیز شرایط اولیه برای مصرف بهداشتی را داشته باشد. در بسیاری از مناطق آب لب‌شور به عنوان آب بهداشتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه در این مناطق با توجه به نسبت تبخیر پایین در دستگاه که کمتر از ۱۰٪ است، بر اساس آزمایش‌های انجام شده تغییرهای کمی در شوری آب گرم خروجی دیده شده است. در نتیجه در این منطقه‌ها می‌توان این دستگاه را مورد استفاده قرار داد.

#### ساخت دستگاه

بر اساس محاسبه‌های و طراحی صورت گرفته دستگاهی با ظرفیت نامی تولید روزانه ۲۰ لیتر آب شیرین و ۲۵۰ لیتر



شکل ۳- تقسیم بخش رطوبت زنی و رطوبت زدایی (الف) و المان های مربوطه (ب).

گرمای گرفته شده از آب توسط فصل مشترک به هوا منتقل می شود از این رو قانون بقای انرژی برای هر یک از جریان های آب و هوا به صورت زیر نوشته می شود:

$$LC_1 dT_1 = h_1 a_H (T_1 - T_i) dz \Rightarrow \quad (2)$$

$$\frac{dT_1}{dz} = \frac{h_1 a_H (T_1 - T_i)}{LC_1}$$

$$GC_g dT_g = h_g a_H (T_i - T_g) dz \Rightarrow \quad (3)$$

$$\frac{dT_g}{dz} = \frac{h_g a_H (T_i - T_g)}{GC_g}$$

از سوی دیگر قانون بقای جرم برای سمت هوا با استفاده از معادله های انتقال جرم برای مرز مشترک و همچنین افزایش رطوبت مطلق هوا به دست می آید:

$$G \cdot dX_g = k_g a_m (X_i - X_g) dz \Rightarrow \quad (4)$$

$$\frac{dX_g}{dz} = \frac{k_g a_m (X_i - X_g)}{G}$$

با یک موازنه حرارت برای مرز مشترک نیز می توان نوشت:

$$h_1 a_H (T_1 - T_i) dz + h_g a_H (T_g - T_i) dz + \quad (5)$$

$$L_v k_g a_m (X_g - X_i) dz = 0$$

به نتیجه آزمایش ها پارامترهای کلیدی طراحی، شناسایی و محدوده مجاز عملکردی آنها تعیین شود. این دستگاه با ۴ عدد کلکتور (بدون صفحه فتوولتاییک) دارای ابعاد ۴×۲ متر و ارتفاع ۲/۲ متر می باشد.

### بخش نظری

#### معادله های حاکم

در این بخش معادله های حاکم بر فرایندهای اصلی دستگاه یعنی رطوبت زنی و رطوبت زدایی هوا ارایه شده است. این معادله های به صورت کامل در مقاله های پیشین ارایه شده است [۸، ۱۱] و در این بخش به صورت خلاصه معادله های اصلی بیان می شود. برای فرایند رطوبت زنی - رطوبت زدایی در آب شیرین کن ابتدا مطابق شکل ۳ (الف) تقسیم بندی این دو بخش انجام می شود و سپس برای هر یک از المان های ارایه شده معادله های انتقال گرما و جرم برای المان های نشان داده شده در شکل ۳ (ب) به صورت زیر استخراج شده است.

در بخش رطوبت زنی برای المان نشان داده شده بر اساس قانون بقای جرم تغییر در شدت جریان آب برابر تغییر در رطوبت مطلق هوا است:

$$dL = G dX_g \Rightarrow \frac{dL}{dz} = G \frac{dX_g}{dz} \quad (1)$$

به دو صورت ارایه شده است. برخی نتیجه‌های به دست آمده ارزیابی لحظه‌ای دستگاه (پس از ایجاد شرایط پایدار) بوده است و برخی دیگر از نتیجه‌های عملکرد روزانه را و تولید کل را مورد ارزیابی قرار داده است. در ادامه به بررسی تأثیر پارامترهای اصلی برای هر دو حالت اشاره شده پرداخته شده است.

یکی از پارامترهای مهم در عملکرد آب‌شیرین‌کن شدت جریان آب در گردش در چگالنده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان دید با افزایش شدت جریان آب کندانسور مقدار تولید آب شیرین افزایش پیدا کرده است. نکته شایان توجه، تطابق خوب داده‌های نظری و تجربی است. از سوی دیگر دیده می‌شود که افزایش شدت جریان آب کندانسور به بیش از ۱/۵ لیتر بر دقیقه تأثیر کمی بر افزایش نرخ تولید دارد. این مطلب نشان می‌دهد که با توجه به کندانسور طراحی شده، آب داخل کندانسور در این حالت بیش‌ترین انرژی ممکن را از هوا دریافت می‌کند.

همچنین همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود با افزایش شدت جریان کندانسور انرژی حرارتی مصرفی نیز افزایش پیدا می‌کند که به منزله افزایش سطح کلکتور مورد نیاز است. همان‌گونه که قابل دیدن است انرژی مصرفی میزان انرژی است که باید توسط انرژی خورشید در مخزن تأمین شود تا دمای آب شور ورودی آب‌شیرین‌کن در دمای دلخواه که در این دستگاه ۷۰ درجه سلسیوس است، ثابت باقی بماند. به طور متوسط ۱۰ درصد خطا بین نتیجه‌های نظری و عملی دیده می‌شود. با توجه به اینکه شدت جریان چگالنده به طور مستقیم بر میزان آب گرم تولیدی تأثیر می‌گذارد مقدار دقیق آن باید با توجه به عملکرد روزانه و حجم آب گرم مورد نیاز تعیین شود.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در این طرح، شدت جریان آب پاششی بر روی آکنه در رطوبت‌زنی است. تأثیر شدت جریان آب رطوبت‌زنی بر روی نرخ تولید در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش شدت جریان آب پاششی بر روی آکنه ابتدا افزایش نرخ تولید وجود دارد که البته تأثیر آن در شدت جریان‌های بالا کاهش پیدا می‌کند. بر این اساس افزایش شدت جریان بیش‌تر از ۲ لیتر بر دقیقه تأثیر چندانی بر نرخ تولید ندارد و تنها ممکن است به افزایش توان مصرفی پمپ یا اندازه آن منجر شود. در نتیجه کم‌ترین شدت جریان در گردش برابر ۲ لیتر بر دقیقه (معادل ۲۰ لیتر بر دقیقه بر متر مربع از سطح مقطع آکنه) انتخاب می‌شود که بسیار پایین‌تر از شدت جریان طغیان برای این نوع آکنه است.

برای محاسبه رطوبت مطلق حالت اشباع در فصل مشترک از رابطه تجربی زیر استفاده شده است [۱۲]:

$$X_i = 2,19 \times 10^{-6} T_i^3 - 1,85 \times 10^{-4} T_i^2 + 7,06 \times 10^{-3} T_i - 0,077 \quad (6)$$

با استفاده از این معادله‌ها می‌توان دمای آب، هوا و فصل مشترک و همچنین رطوبت هوا در خروجی المان و فصل مشترک را محاسبه نمود. برای استخراج معادله‌های حاکم بر فرایند رطوبت‌زدایی از همان روش مورد استفاده در فرایند رطوبت‌زنی استفاده شده است با این تفاوت که دو فاز به‌وسیله سطح چگالنده از یکدیگر جدا شده است. موازنه انرژی بین جریان آب و جریان هوا با فصل مشترک به ترتیب عبارت است از:

$$C_c dT_c = U a_{Hc} (T_{ic} - T_c) \Rightarrow \frac{dT_c}{dz} = \frac{U a_{Hc} (T_{ic} - T_c)}{D C_c} \quad (7)$$

$$G C_{gc} dT_{gc} = h_{gc} a_{Hc} (T_{gc} - T_{ic}) dZ + \quad (8)$$

$$L_v k_{gc} a_{Mc} (X_{gc} - X_{ic}) dZ \Rightarrow$$

$$\frac{dT_{gc}}{dZ} = \frac{h_{gc} a_{Hc} (T_{gc} - T_{ic}) + L_v k_{gc} a_{Mc} (X_{gc} - X_{ic})}{G C_{gc}}$$

موازنه انتقال جرم بین سطح خارجی لایه مایع و هوا به صورت زیر است:

$$G dX_{gc} = k_{gc} a_{Mc} (X_{ic} - X_{gc}) dZ \Rightarrow \quad (9)$$

$$\frac{dX_{gc}}{dZ} = \frac{k_{gc} a_{Mc} (X_{ic} - X_{gc})}{G}$$

در مرز مشترک لایه مایع و هوا نیز معادله زیر برقرار است:

$$L_v k_{gc} a_{Mc} (X_{gc} - X_{ic}) dZ + h_{gc} a_{Hc} (T_{gc} - T_{ic}) dZ + U a_{Hc} (T_c - T_{ic}) dZ = 0 \quad (10)$$

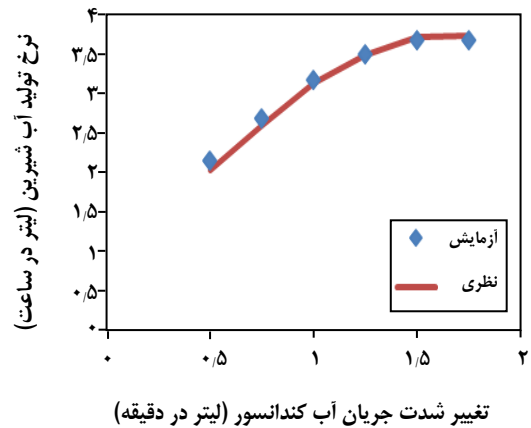
جزئیات بیشتر محاسبه‌های و مقادیرهای ضریب‌ها به صورت تفصیلی در مطالعه‌های پیشین ارایه شده است [۱۳].

### اعتبارسنجی طرح و تحلیل نتیجه‌های آزمایش‌ها

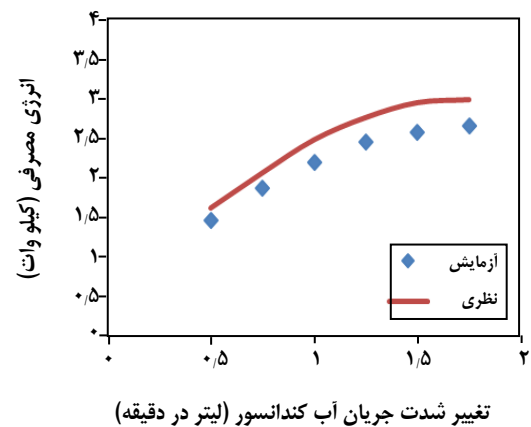
پس از ساخت و راه‌اندازی دستگاه، آزمایش‌های گوناگون برای بررسی عملکرد آن انجام گرفت. تأثیر پارامترهای اصلی مانند شدت جریان آب ورودی کندانسور، دمای کنترلی دستگاه بر خروجی دستگاه از جمله نرخ و حجم کل آب شیرین و آب گرم تولیدی و بازده عملکردی دستگاه مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ها

آزمایش‌هایی نیز برای بررسی عملکرد دستگاه در دو حالت جابه‌جایی آزاد و جابه‌جایی اجباری هوا درون برج‌ها انجام شد. در شکل ۷ مقایسه‌ای بین میزان نرخ تولید آب شیرین در دو حالت صورت گرفته است. در این آزمایش، در حجم اولیه ثابت مخزن آب گرم، میزان شدت جریان آب ورودی چگالنده به عنوان متغیر در نظر گرفته شده تا اثر این تغییر در عملکرد دستگاه دیده شود. همان‌گونه که دیده می‌شود در شدت جریان‌های پایین، تولید در حالت طبیعی و اجباری به هم نزدیک است ولی در شدت جریان‌های بالاتر، جریان اجباری هوا تولید آب شیرین بیشتری خواهد داشت. بررسی این موضوع با نگاهی به وضعیت مصرف انرژی کامل می‌شود. نتیجه‌های آزمایش‌ها روند همانندی مانند شکل ۶ را نشان داد و در شدت جریان کمتر از ۱ لیتر بر دقیقه، مصرف انرژی در حالت اجباری تفاوت چندانی با حالت طبیعی ندارد درحالی که در شدت جریان‌های بالاتر کندانسور مصرف انرژی افزایش یافته است. با توجه به اینکه افزایش مصرف انرژی به افزایش سطح کلکتورهای خورشید و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری منجر می‌شود، و همچنین از سوی دیگر ایجاد جریان اجباری نیازمند استفاده از دمنده و مصرف برق است، در نتیجه جریان طبیعی بر جریان اجباری به ویژه در شدت جریان‌های کمتر از ۱ لیتر بر دقیقه برتری دارد.

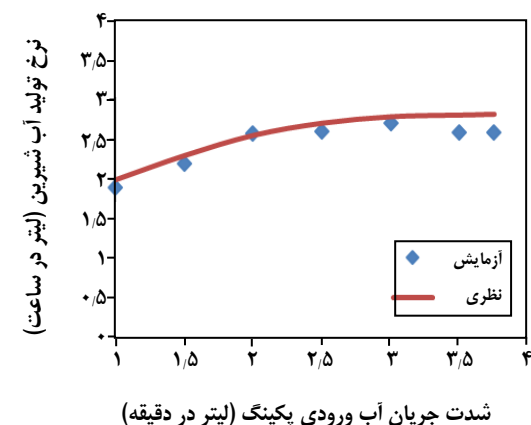
در نمودارهای پیشین تأثیر پارامترهای اصلی بر عملکرد لحظه‌ای آب شیرین کن مورد بررسی قرار گرفت. دسته دیگر آزمایش‌ها نیز به صورت روزانه انجام شد که در ادامه عملکرد دستگاه مبتنی بر این نتیجه‌های ارایه شده است تا پارامترهای عملکردی دیگر تعیین شود. در این دسته از آزمایش‌ها، پارامترهای مدنظر از ابتدای عملکرد دستگاه ثابت بوده و دستگاه با توجه به شرایط تعیین شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجا که شدت جریان چگالنده باید با توجه به عملکرد روزانه تعیین شود، در نتیجه تأثیر این پارامتر در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق این نمودار با افزایش شدت جریان چگالنده، تولید آب شیرین نیز افزایش یافته و در مقدارهای بیشتر از ۰/۷۵ لیتر در دقیقه از تأثیر این پارامتر کاسته می‌شود. با وجود افزایش میزان تولید آب شیرین، تأثیر زیاد این پارامتر در شدت جریان‌های بالا بر میزان تولید آب گرم و کاهش دمای مخزن تأثیر چشمگیری داشته در نتیجه با توجه به محدودیت حجم آب گرم مصرفی، تعیین محدوده‌ای مجاز برای این پارامتر کلیدی می‌باشد که بر این اساس شدت جریان متوسط ۰/۷۵ لیتر بر دقیقه انتخاب شد. همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود با افزایش شدت جریان ورودی به کندانسور تعداد ساعت‌های



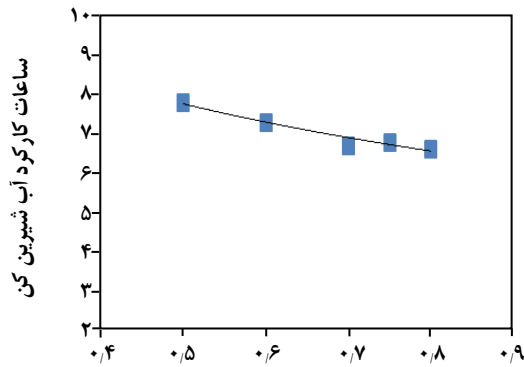
شکل ۴- نرخ تولید آب شیرین نسبت به تغییر شدت جریان آب کندانسور در حالت بدون فن.



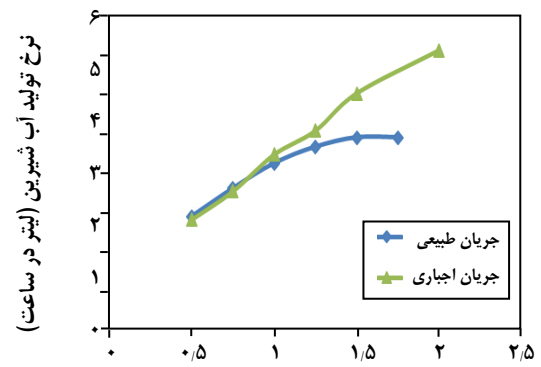
شکل ۵- تغییر انرژی گرمایی مصرفی نسبت به تغییر شدت جریان آب کندانسور در حالت بدون فن.



شکل ۶- تأثیر شدت جریان آب ورودی رطوبت‌زنی بر نرخ تولید.



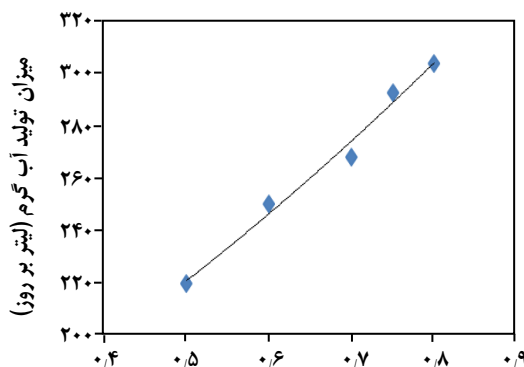
شکل ۹ - تعداد ساعات کارکرد دستگاه با توجه به شدت جریان آب چگالنده.



شکل ۷ - نرخ تولید آب شیرین نسبت به تغییر شدت جریان آب ورودی در دو حالت جابجایی طبیعی و اجباری.

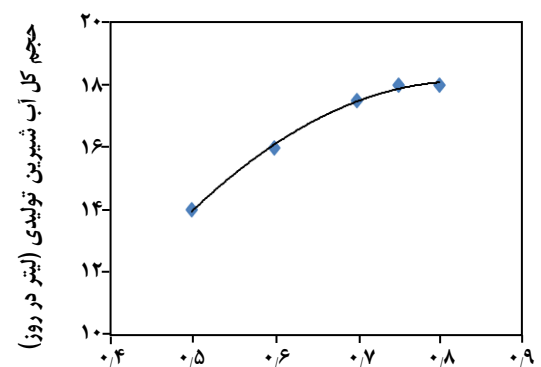
شکل ۹ - تعداد ساعات کارکرد دستگاه با توجه به شدت جریان آب چگالنده.

شکل ۷ - نرخ تولید آب شیرین نسبت به تغییر شدت جریان آب ورودی در دو حالت جابجایی طبیعی و اجباری.



شکل ۱۰ - تأثیر شدت جریان چگالنده بر تولید روزانه آب گرم.

شکل ۱۰ - تأثیر شدت جریان چگالنده بر تولید روزانه آب گرم.



شکل ۸ - تأثیر شدت جریان آب ورودی چگالنده بر تولید آب شیرین.

شکل ۸ - تأثیر شدت جریان آب ورودی چگالنده بر تولید آب شیرین.

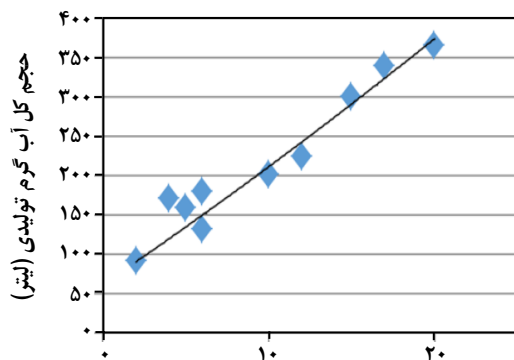
از مخلوط شدن با آب سرد) در بازه‌ی ۴۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس است. زمانی که دمای آب گرم مخزن کمتر از ۶۰ درجه سلسیوس باشد (عدد ۲۵۰ لیتر در روز برای هر خانوار بر اساس این دما تعیین شده است)، مقدار آب سرد کمتری برای رسیدن به دمای مصرف نیاز خواهد بود. در نتیجه دمای آب گرم تولید شده نیز دارای اهمیت است که با توجه به دمای تنظیم برای خاموش شدن دستگاه تعیین می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### تحلیل بازه دمایی عملکرد دستگاه

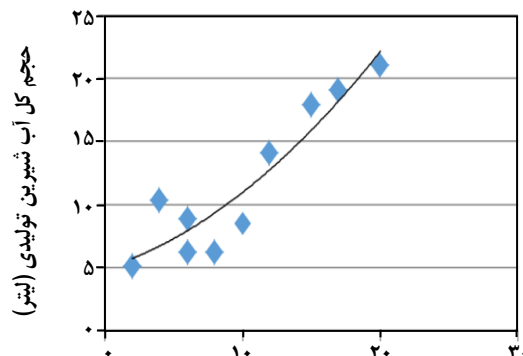
همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، برای عملکرد دستگاه از سامانه کنترلی خودکاری استفاده شده است که بر اساس دمای آب گرم مخزن، آب‌شیرین‌کن را روشن و خاموش می‌کند.

کارکرد دستگاه کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان کاهش دمای آب خروجی از چگالنده و در نتیجه کاهش تندتر دمای آب مخزن گرم بیان نمود. اما با وجود کاهش ساعات کار دستگاه به دلیل افزایش شدت جریان چگالنده و تأثیر قالب آن نرخ تولید آب گرم دستگاه مطابق شکل ۱۰ افزایش یافته است. از آنجا که محدودیت مصرف آب گرم وجود دارد، در نتیجه باید از این دیدگاه عدد بیشینه‌ای برای تولید آب گرم منظور نمود. آنچه مسلم است، با افزایش شدت جریان چگالنده به شدت نرخ دورریز آب در دستگاه افزایش می‌یابد. در نتیجه برای داشتن تولید کمینه ۲۵۰ لیتر آب گرم، شدت جریان مناسب ۰/۶ لیتر بر دقیقه می‌باشد. اما چنانچه شدت جریان چگالنده برای داشتن تولید مناسب آب شیرین برابر ۰/۷۵ انتخاب شود، دیده می‌شود که بیش به ۲۹۰ لیتر آب گرم تولید خواهد شد. دمای دلخواه آب گرم در محل مصرف (پس





بازه دمایی عملکرد آب شیرین کن



بازه دمایی عملکرد آب شیرین کن

شکل ۱۲ - میزان تولید آب گرم مصرفی در مقابل تغییر بازه‌ی دمایی عملکرد آب شیرین کن.

تعیین بازه عملکرد دستگاه باید با توجه به دو پارامتر میزان تولید آب شیرین و میزان تولید آب گرم صورت گیرد تا هم آب شرب مورد نیاز تأمین شود و نیز از سویی دورریز آب گرم تولید شده به کمترین میزان برسد. در نتیجه این پارامتر باید با توجه به نیاز مصرف کننده تنظیم شود که این امکان بر روی سامانه کنترلی دستگاه وجود دارد. با توجه به نمودار شکل‌های ۱۱ و ۱۲ با انتخاب بازه‌ی عملکرد ۱۵ درجه سلسیوس، میزان تولید آب شیرین به ۱۸ لیتر و تولید آب گرم به حدود ۳۰۰ لیتر خواهد رسید. روشن است که با انتخاب اختلاف دمایی ۱۵ درجه سلسیوس، دستگاه در دمایی ۵۵ درجه سلسیوس خاموش خواهد شد. با در نظر گرفتن کاهش حدود ۵ درجه‌ای دمایی مخزن بر اثر تبادل گرما با محیط، دمایی نهایی آب گرم با توجه به زمان مصرف بین ۵۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس خواهد بود.

#### تحلیل عملکرد سامانه خورشیدی

با ثبت داده‌های مربوط به تابش خورشید، عملکرد این سامانه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. این دستگاه در ماه‌های بهار و تابستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نمودار مهمی که در تحلیل عملکرد کلکتور می‌توان رسم کرد، بازده کلکتور بر مبنای پارامتر  $(T_i - T_a) / I$  می‌باشد. بازده نیز به صورت نسبت انرژی دریافت شده توسط سیال کلکتور به انرژی تابش کل بر روی کلکتورها تعیین شده است. در واقع به کمک این نمودار در دمایی مشخص و تابش دریافتی معلوم در روزهای تابستان از کلکتور می‌توان به بازده کلکتور رسید.  $T_a$  و  $T_i$  به ترتیب دمایی آب درون کلکتور که برابر میانگین دمایی ورودی و خروجی کلکتور در نظر گرفته شده است و دمایی هوا بر حسب درجه سلسیوس است که در زمان آزمایش

شکل ۱۱ - میزان تولید آب شیرین در مقابل تغییر بازه‌ی دمایی عملکرد آب شیرین کن.

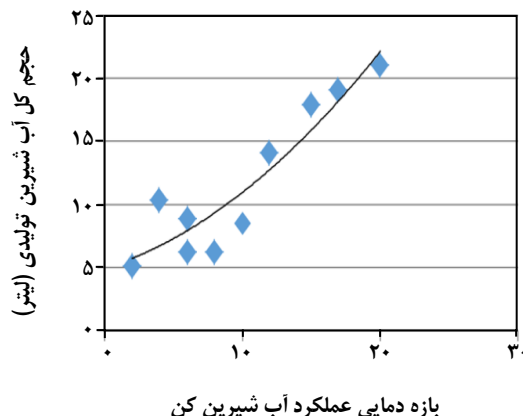
دمای آغاز به کار و بازه‌ی دمایی مجاز به عنوان دو پارامتر ورودی در تنظیم اولیه دستگاه تعیین می‌شود. مطابق آنچه گفته شد، دمای شروع به کار آب شیرین کن ۷۰ درجه سلسیوس تعیین شده است. پس از روشن شدن آب شیرین کن، گرما از مخزن گرفته می‌شود و از سویی انرژی خورشید مخزن را گرم می‌کند. در ساعت‌های پایان روز که تابش خورشید کاهش پیدا می‌کند، دمای مخزن نیز افت پیدا می‌کند که موجب کاهش تولید آب شیرین می‌شود. برای خاموش نمودن دستگاه در دماهای پایین‌تر یک بازه دمایی در سامانه کنترلی تعریف می‌شود که اختلاف دمایی روشن و خاموش شدن دستگاه است. مثلاً چنانچه بازه‌ی دمایی عملکرد برابر ۱۰ درجه تعریف شود، آب شیرین کن در دمایی ۷۰ درجه سلسیوس روشن و در دمایی ۶۰ درجه خاموش خواهد شد. در این آزمایش با ثابت نگه داشتن پارامترها به بررسی تأثیر تغییر بازه‌ی دمایی عملکرد دستگاه آب شیرین کن پرداخته شد. دمای بهینه برای روشن شدن آب شیرین کن ۷۰ درجه سلسیوس انتخاب شده است [۱۰]. هر چه بازه‌ی عملکرد دمایی آب شیرین کن بیش‌تر باشد، مدت زمان کار دستگاه افزایش یافته در نتیجه حجم تولید آب شیرین بیشتر می‌شود (شکل ۱۱). افزایش بازه‌ی دمایی عملکرد به منزله کارکرد دستگاه در دماهای پایین‌تر است که بیش‌تر در پایان روز اتفاق می‌افتد. همچنین هر چه این بازه کم‌تر باشد فرصت کارکرد آب شیرین کن کم‌تر بوده و زودتر خاموش می‌شود. در صورتی که بازه‌ی دمایی مجاز افزایش یابد مدت زمان کارکرد دستگاه آب شیرین کن نیز افزایش یافته و مطابق شکل ۱۲ حجم مخزن آب گرم و در نتیجه میزان تولید آب گرم نیز افزایش می‌یابد.

اطلاعات انرژی آمریکا (EIA) هر لیتر بنزین که در وسایل بنزینی می‌سوزد ۲/۴ کیلوگرم کربن دی اکسید و برای گاز طبیعی، با سوختن هر میلیون فوت مکعب (۲۸۳۰۰ متر مکعب) گاز، ۶۰/۳ تن کربن دی اکسید تولید می‌شود. که بر این اساس برای تأمین آب گرم مورد نیاز یک واحد مسکونی، با سوخت اشاره شده ۴/۲ کیلوگرم کربن دی اکسید در روز تولید خواهد شد. این درحالی است که کل کربن دی اکسید تولیدی در اثر مصرف برق در این دستگاه حدود ۰/۵۶ کیلوگرم در روز است و در صورت استفاده از پنل‌های فتوولتاییک این مقدار نیز به صفر خواهد رسید. براین اساس میزان انتشار گازهای آلاینده محیط زیست در این طرح بسیار ناچیز بوده و قابل چشم پوشی می‌باشد. به‌طور کلی برتری‌های زیست محیطی استفاده از انرژی پاک خورشید در این طرح نیز مطرح بوده و با توجه به نیاز موجود می‌توان به گونه‌ای به توسعه کاربرد این منبع انرژی تجدیدپذیر در کشور کمک نماید.

در مینه پساب تولیدی با توجه به این‌که حجم بیشتر آب شور ورودی به دستگاه به صورت آب گرم بهداشتی مصرف می‌شود، این مهم موجب حفظ بیشتر منابع آبی موجود می‌شود. چرا که در دستگاه‌های آب شیرین کن متداول همواره بخش بیشتری از آب ورودی به صورت پساب خارج و دورریز می‌شود. در ارتباط با میزان شورآب دفع شده به محیط، می‌توان اذعان داشت شورآبی چشمگیری به محیط وارد نمی‌شود. تنها در برخی از روزها که میزان تابش بسیار مناسب بوده یا مصرف آب گرم کمتر شده باشد، مقدار کمی از آب گرم تولیدی دور ریز خواهد شد که به صورت محلی و همراه با پساب ساختمان دفع می‌شود. گرچه بنا به مورد استفاده شاید بتوان این آب را نیز ذخیره کرده و در صورت نیاز دوباره استفاده نمود. در نتیجه این طرح با محیط زیست سازگار بوده و می‌تواند به گسترش به‌کارگیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور کمک نماید. از این رو لزوم ارزیابی اقتصادی به‌کارگیری این دستگاه در مناطق گوناگون کشور در پژوهش‌های آینده ضرورت دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک دستگاه ترکیبی آب گرم کن - آب شیرین کن خورشیدی بر پایه فرایند رطوبت زنی و رطوبت زدایی (در بخش آب شیرین کن) طراحی و ساخته شده است.



شکل ۱۳- بازده عملکردی کلکتور در مقابل دما و تابش ورودی متغیر.

ثبت شده است. همچنین I تابش دریافتی کلکتور (وات بر متر مربع) می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ قابل دیدن است بازده کلکتور خورشیدی مورد نظر بین ۲۵ تا ۳۰ درصد در نوسان بوده است.

### ارزیابی زیست محیطی

این طرح با توجه به تولید دو فراورده‌ی همزمان یعنی آب گرم و آب شیرین، باید با روش‌های جایگزین مقایسه شود. در روش‌های متداول و موجود برای تولید هر یک از این دو فراورده مقدارهای زیادی انرژی فسیلی یا برق معادل آن باید مصرف شود. آب شیرین کن‌های غشایی خانگی دارای محدودیت استفاده در آب‌های لب‌شور با TDS بالاتر از ۲۰۰۰ ppm هستند. این درحالی است که بر اساس نتیجه‌های آزمایش‌ها، محدودیتی در شوری آب ورودی در دستگاه ترکیبی خورشیدی وجود ندارد. یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی دستگاه آب شیرین کن کیفیت آب تولیدی است. با استفاده از نمونه‌گیری و انجام آنالیز شیمیایی آب ورودی و خروجی، عملکرد دستگاه در شیرین‌سازی آب مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتیجه‌های به‌دست آمده با توجه به ماهیت فرایند تبخیر و میعان آب، بیشتر املاح آب گرفته شده و دیده می‌شود درحالی که غلظت کل مواد جامد محلول (TDS) در ورودی بیش از ۶۰۰۰ ppm بوده است، آب خروجی دارای غلظت کمتر از ۵۰ ppm بوده است. از سوی دیگر در صورت استفاده از یک آب گرم کن گازی یا دیگ آب گرم (با راندمان متوسط ۸۰٪) برای گرمایش ۳۰۰ لیتر آب تا دمای ۶۰ درجه سلسیوس، حدود ۶۰ MJ انرژی لازم است که بیش از ۲ متر مکعب گاز لازم است و همچنین بر اساس آمار منتشر شده از سوی مدیریت

## فهرست نمادها

a	سطح ویژه آکنه، $m^2/m^3$
C	ظرفیت گرمای ویژه، J/kgK
G	شدت جریان جرمی هوا، kg/s
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، $W/m^2K$
L	شدت جریان جرمی آب، kg/s
$L_v$	گرمای نهان تبخیر، J/kg
T	دما، $K, ^\circ C$
z	ارتفاع، m
X	رطوبت مطلق، kg vapor/kg dry air

## زیرنویس‌ها

c	رطوبت‌زدایی
e	رطوبت‌زنی
g	هوا
L	آب
v	بخار آب

فرایند ترکیبی به گونه ای مناسب طراحی شده است تا افزون بر سادگی ساختار فنی، بتواند همزمان آب شرب و آب گرم مورد نیاز یک مصرف کننده خانگی را تأمین نماید. کل انرژی گرمایی مورد نیاز دستگاه از انرژی خورشید تأمین می‌شود. ساختار ترکیبی دو دستگاه آب شیرین کن و آب گرم کن عامل مهم و تأثیرگذاری در کاهش میزان دورریز آب می‌باشد و می‌تواند مقدار آن را به صفر کاهش دهد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده پارامترهای کلیدی مانند شدت جریان چگالنده، شدت جریان رطوبت‌زنی، بازه‌ی دمایی عملکرد دستگاه در مقدارهای مناسب ثابت شد. همچنین نتیجه‌ها نشان دهنده برتری جریان طبیعی هوا بر جریان اجباری در محفظه آب شیرین کن بود. نتیجه‌های آزمایش روزانه دستگاه نشان داد این دستگاه در شرایط نامی کارکرد خود می‌تواند تا ۲۰ لیتر آب شیرین و بیش از ۳۰۰ لیتر آب گرم در دمای ۵۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس در روز را تأمین کند که نیاز معمول یک خانوار ۴ نفره است. آب شرب تولیدی دارای TDS کمتر از ۵۰ ppm بوده است. با توجه به ویژگی‌های مطرح شده و وابستگی این دستگاه به میزان تابش دریافتی خورشید، استفاده از این دستگاه در مناطق کویری و دورافتاده بسیار مناسب می‌باشد. انجام پژوهش‌های ارزیابی اقتصادی دقیق برای بکه‌ارگیری این دستگاه در مناطق گوناگون کشور در در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۳۰

## مراجع

- [1] Ben Bacha H., Bouzguenda M., Abid M.S., Maalej A.Y., Modeling and Simulation of a Water Desalination Station with Solar Multiple Condensation Evaporation Cycle Technique, *Renewable Energy*, **18**: 349-365 (1999).
- [2] Ben Bacha H., Malej A.Y., Ben Dhia H., Ulber I., Uchtmann H., Engelhardt M., Krelle J., Perspective of Solar-Powered Desalination with the SMCEC Technique, *Desalination*, **122**: 177-183 (1999).
- [3] BenBacha H., Damak T., Bouzguenda M., Mallej A.Y., Ben Dhia H., Study of A Water Desalination Station Using the SMCEC Technique: Dynamic Modeling and Simulation, *Desalination*, **137**: 53-61 (2001).
- [4] BenBacha H., Damak T, Bouzguenda M., Mallej A.Y., Ben Dhia H., A Methodology to Design and Predict Operation of A Solar Collector for a Salar-Powered Desalination unit Using the SMCEC Principde, *Desalination*, **156**: 305-313 (2003).
- [5] Zehui Changa, Hongfei Zhenga., Yingjun Yanga, Yuehong Suc., Zhanchun Duana, Experimental Investigation of A Novel Multi-Effect Solar Desalination System Based on Humidification-Dehumidification Process, *Renewable Energy*, **69**: 253-259 (2014).

- [6] Kabeel A.E., El-Said E.M.S., A Hybrid Solar Desalination System of Air Humidification, Dehumidification and Water Flashing Evaporation. Experimental Investigation, *Desalination*, **341**: 50-60 (2014).
- [7] Guofeng Yuana., Zhifeng Wanga., Hongyong Lib., Xing Lib., Experimental Study of A Solar Desalination System Based on Humidification Dehumidification Process, *Desalination*, **277**: 92-98 (2011).
- [8] Soufari S.M., Zamen M., Amidpour M., Experimental Validation of An Optimized Solar Humidification-Dehumidification Desalination Unit, *Desalination and Water Treatment*, **6**: 244-251 (2009).
- [9] Zamen M., Soufari S.M., Abbasian Vahdat S., Amidpour M., Zeinali M.A.A., Izanloo H., Aghababaie H., Experimental Investigation of a Two-Stage Solar Humidification-Dehumidification Desalination Process, *Desalination*, **332**: 1-6 (2014).
- [۱۰] ضامن، محمد؛ گزارش طرح "طراحی سیستم ترکیبی آبگرمکن/آب شیرین کن خورشیدی خانگی"، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران، کارفرما: شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، (۱۳۸۸).
- [11] Zamen M., Amidpour M., Soufari S.M., Cost Optimization of a Solar Humidification-Dehumidification Desalination Unit Using Mathematical Programming, *Desalination*, **239**: 92-99 (2009).
- [12] Stocker W.F., Jones J.W., "Refrigeration and Air Conditioning", McGraw Hill, Singapore, (1982).
- [13] Soufari S.M., Zamen M., Amidpour M., Performance Optimization of Humidification-Dehumidification Desalination Process Using Mathematical Programming, *Desalination*, **237**: 305-317 (2009).