



## ساخت و شبیه‌سازی یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی-رطوبت زدایی

ابراهیم جهانشاهی جواران<sup>1\*</sup>، علی حسین خانی<sup>2</sup>، سید محمد حجت محمدی<sup>1</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

\* صندوق پستی 7631133131، e.jahanshahi@kgut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 شهریور 1395

پذیرش: 04 آبان 1395

ارائه در سایت: 21 آذر 1395

کلید واژگان:

انرژی خورشیدی،

آب شیرین کن

رطوبت زنی

رطوبت گیر

هوا گرم کن

### چکیده

آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی-رطوبت‌زدایی، یکی از کارآمدترین روش‌های شیرین‌سازی آب در مقیاس کوچک برای مناطق دورافتاده و کم‌جمعیت می‌باشد. هدف از این مطالعه، ساخت و شبیه‌سازی یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی-رطوبت‌زدایی با ظرفیت 20 لیتر در روز است. این سیستم از واحدهای رطوبت زنی، رطوبت‌گیر، هوا گرم‌کن خورشیدی و آب گرم‌کن خورشیدی تشکیل شده است. برای انجام این تحقیق، ابتدا به تشریح و مدل‌سازی این سیستم پرداخته می‌شود. در ادامه، به فرآیند ساخت هوا گرم‌کن خورشیدی و قسمت‌های مختلف سیستم آب شیرین کن پرداخته می‌شود. پس از تکمیل فرآیند ساخت آب شیرین کن، این سیستم مورد آزمایش قرار می‌گیرد و تأثیر پارامترهای اساسی از جمله دمای آب و هوای ورودی به واحد رطوبت زنی، دما و دبی آب ورودی به واحد رطوبت‌گیر بر عملکرد سیستم و میزان تولید آب شیرین مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر دمای آب نسبت به هوا بر روی میزان آب شیرین تولید شده بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از آب چیلر، که دمای آن در محدوده دمای آب چاه قرار دارد، در ورودی واحد رطوبت‌گیر افزایش 31 درصدی میزان آب تولید شده را به دنبال دارد. همچنین، بهترین دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر مقدار 0.12 kg/s می‌باشد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی باهم مقایسه می‌شوند و سازگاری خوبی بین نتایج مشاهده می‌گردد.

## Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system

Ebrahim Jahanshahi Javaran<sup>\*</sup>, Ali Hossein Khani, Seyed Mohammad Hoojjat Mohammadi

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

\* P.O.B. 7631133131, Kerman, Iran, e.jahanshahi@kgut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 24 August 2016  
Accepted 25 October 2016  
Available Online 11 December 2016

#### Keywords:

Solar Energy  
Desalination  
Humidifier  
Dehumidifier  
Air heater

### ABSTRACT

Solar humidification-dehumidification desalination is one of the most practical methods for water desalination in small scale for regions far from cities and with low population. The aim of this study is manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system with capacity of 20 lit/day. This system consists of humidification and dehumidification units, solar air and water heaters. To this end, first this system is explained and modeled. Then, manufacturing process of solar air heaters and different parts of desalination system is investigated. After the manufacturing process of the desalination system, this system is experimentally tested and the effect of pertinent parameters, such as the temperature of inlet water and air to humidifier; inlet water temperature and flow rate to dehumidifier on the performance of the system and distillate product are investigated. The results show that the effect of water temperature on the fresh water produced is more than air temperature. Moreover, using the chilled water, which has a temperature in the range of water well temperature, in the dehumidifier inlet leads to an increase of 31 % in the fresh water produced. Also, the best water flow rate to the dehumidifier inlet is 0.12 kg/s. Finally, experimental and simulation results are compared with each other and good consistency is seen.

### 1- مقدمه

شیرین در ظرفیت‌های پایین مرتفع می‌شود. با توجه به شدت تابش مناسب خورشید در مناطقی که غالباً با مشکل تأمین آب شرب روبرو هستند استفاده از انرژی خورشید در شیرین کردن آب می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. یکی از روش‌ها در این زمینه استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به روش رطوبت زنی-رطوبت‌زدایی<sup>1</sup> هوا، است. روش کار این نوع آب شیرین کن بر این مبنا استوار است که هوا قابلیت جذب و حمل میزان قابل توجهی بخار آب را

آب یکی از مهم‌ترین نیازهای حیاتی بشر است. با وجود این که سه‌چهارم سطح زمین را آب پوشانده است، اما تنها 3% از آب‌های روی زمین شیرین و مابقی را آب‌های شور دریاها و اقیانوس‌ها تشکیل می‌دهند. از این 3% نیز 77% به صورت یخ‌های قطبی، 22% به صورت آب‌های زیرزمینی و تنها 1% آن در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها قرار دارد [1]. با توجه به نیاز کشور به آب در بخش‌های مختلف صنعت، شرب و کشاورزی، بخشی از این نیاز با تولید آب

<sup>1</sup> Humidification-Dehumidification (HD)

Please cite this article using:

E. Jahanshahi Javaran, A. Hossein Khani, S. M. H. Mohammadi, Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 239-248, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Jahanshahi Javaran, A. Hossein Khani, S. M. H. Mohammadi, Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 239-248, 2016 (in Persian)

در دماهای بالا دارد. با توجه به پایین بودن ذاتی ظرفیت تولید این روش و اینکه در این روش نیاز به تولید بخار آب نیست و دمای عملکرد آن نیز نسبتاً پایین است تمام انرژی حرارتی موردنیاز آن می‌تواند از انرژی خورشید تأمین شود. از این رو، این روش برای مناطق دورافتاده و کم‌جمعیت کویری و مناطقی که دسترسی به انرژی فسیلی ندارند گزینه مناسبی می‌باشد.

مطالعات گسترده‌ای بر روی آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی انجام شده است. همیه و بکمان و [2] آب‌شیرین‌کنی را توسعه دادند که سیستم عملکرد آن براساس تبخیر و چگالش بنا شده بود. این سیستم از دو بخش چگالنده و تبخیرکننده تشکیل شده که توسط یک دیواره از یکدیگر جدا می‌شوند. در سمت تبخیرکننده آب‌شور روی دیواره به‌صورت فیلم نازک جریان دارد. هوا از پایین تبخیرکننده وارد شده و رطوبت را از آب‌شور جذب می‌کند و از بالای تبخیرکننده خارج شده و وارد چگالنده می‌شود. در این بخش با انتقال حرارت با دیواره حائل، قطرات آب چگالیده شده و به‌صورت فیلم مایع از روی جدار حائل در پایین دستگاه جمع می‌شود.

چفیک [3] در سال 2002 یک روش جدید برای شیرین کردن آب دریا با استفاده از انرژی خورشیدی را ارائه داده است. در این روش، انرژی خورشید، جریان هوا را تا دمای 50 تا 80 درجه سلسیوس بالا می‌برد. هوای گرم شده توسط خورشید با استفاده از تزریق آب دریا مرطوب می‌گردد. سپس آب بدون نمک از طریق سرد کردن هوای مرطوب استخراج می‌گردد. همچنین، در این تحقیق روش بهینه‌سازی فرایند آب‌شیرین‌کن با انتخاب پارامترهای بهینه توضیح داده شده است.

در سال 2007، یوان و ژانگ [4]، مدل‌سازی ریاضی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی براساس فرایند رطوبت زنی و رطوبت‌گیری با سیکل بسته را انجام دادند. در این تحقیق، سطح گرم‌کن خورشیدی، دبی آب مورد استفاده درون کندانسور، دبی آب دریا و ابعاد دستگاه روی تولید آب‌شیرین‌کن آنالیز و بررسی شده است.

در سال 2007 کیبلای و بنات [5]، انواع مختلف تکنولوژی‌های آب‌شیرین‌کن و تجاری‌سازی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، تمرکز اولیه بر روی تکنولوژی‌های مناسب برای مناطق دوردستی بود که قابلیت ترکیب با سیستم‌های خورشیدی را دارا هستند. یکی از بهترین سیستم‌ها برای استفاده در مناطق دوردست و کم‌جمعیت آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی می‌باشد. این آب‌شیرین‌کن می‌تواند تمام انرژی حرارتی موردنیاز خود را از خورشید دریافت کند.

تحقیقات جامعی در پژوهشگاه توسعه صنایع شیمیایی ایران باهدف به کارگیری انرژی خورشیدی در آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی صورت گرفت. در مرحله اول، بهینه‌سازی فرایند جهت حداقل‌سازی شدت مصرف انرژی انجام شد. در مرحله بعد، با اضافه نمودن کلکتور خورشیدی و همچنین پارامترهای مربوط به هزینه سیستم آب‌شیرین‌کن، بهینه‌سازی کل سیستم با تابع هدف حداقل نمودن هزینه صورت گرفت. در ادامه، بر مبنای نتایج تئوری به‌دست آمده دستگاهی با ظرفیت تولید 10 لیتر آب شیرین در ساعت طراحی و نتایج بهینه‌سازی سیستم ارائه شد [6-8].

خادمی‌نژاد و رحیم‌زاده در سال 2015، به بررسی ترمودینامیکی (قوانین اول و دوم) سامانه شیرین‌سازی آب به روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی براساس سیکل بسته هوا - باز آب پرداختند [9]. آن‌ها تاثیر پارامترهای حاکم بر مساله مانند ضریب‌های اثربخشی محفظه‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی، دمای آب ورودی به محفظه‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی و نسبت شدت

جریان جرمی را بر نسبت خروجی سامانه و نرخ تولید انرژی بی‌بعد شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در نسبت شدت جریان‌های پایین، نسبت خروجی به ازای دماهای پایین‌تر آب ورودی به محفظه رطوبت‌زدایی افزایش پیدا می‌کند.

ضمین و همکاران در سال 2015، عملکرد سامانه ترکیبی آب‌گرم‌کن - آب شیرین‌کن خورشیدی خانگی را مورد ارزیابی قرار دادند و پس از بررسی ترکیبی‌های گوناگون این دو دستگاه و انتخاب و ارزیابی فرایند نهایی، ساخت دستگاه ترکیبی در پژوهشگاه توسعه صنایع شیمیایی ایران انجام شد و مورد آزمایش قرار گرفت [10]. پارامترهای گوناگون و موثر بر عملکرد دستگاه دستگاه مانند شدت جریان ورودی به کندانسور، محدوده دمایی عملکرد آب شیرین‌کن و میزان تابش دریافتی خورشید مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در فرایند طراحی شده آب شور خروجی از آب شیرین‌کن به عنوان آب گرم مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نتیجه میزان استفاده از آب گرم توسط مصرف‌کننده دورریز آب دستگاه کاهش می‌یابد.

نافی و همکاران [11,12] مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی فرایند آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی در شهر سوئز یونان انجام دادند. تأسیسات سازنده این واحد شامل مجموعه برج رطوبت‌زن، برج رطوبت‌گیر بوده که در کنار کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت (برای گرم کردن هوا) و متمرکز کننده (برای گرم کردن آب) قرار گرفته‌اند. در نتایج به‌دست‌آمده سرعت باد ناچیز در نظر گرفته شده است. این نتایج نشان می‌دهند که درجه حرارت آب و هوای ورودی به برج رطوبت‌زن در تولید آب شیرین واحد تأثیر بسزایی دارد. آن‌ها یک معادله کلی برای تخمین میزان تولید آب شیرین سیستم معرفی کرده و از طرفی یک طرح محاسباتی کلی برای واحد آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی ارائه دادند.

دنیز و سینار [13] در سال 2016 یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی را در ترکیب طراحی نموده و سپس به ساخت سیستم طراحی شده پرداختند. تمام انرژی موردنیاز دستگاه از انرژی خورشیدی تأمین شده است. در ادامه، آنالیز انرژی، آگزرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی دستگاه انجام شد. حداکثر بهره‌وری انرژی روزانه برای این سیستم 31.54% و حداکثر راندمان انرژی آن 1.87% گزارش شده است. همچنین، ظرفیت تولید آب شیرین این دستگاه حداکثر 1117.3 g/h می‌باشد. علاوه بر این، هزینه آب شیرین تولید شده 0.0981 USD/L برآورد شده است.

هدف از انجام این پژوهش، ساخت یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نوع رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی و آزمایش آن در شرایط آب و هوایی شهر کرمان و در ادامه شبیه‌سازی این سیستم در نرم افزار EES<sup>1</sup> و مقایسه نتایج آزمایشگاهی با شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد آب شیرین با استفاده از کد نوشته شده در سایر شرایط می‌باشد. در پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات قبلی در مراجع [6-8]، برای افزایش میزان آب شیرین تولید شده، از هوا گرم‌کن خورشیدی برای گرم کردن هوای محیط استفاده شده است. بدین منظور، برای افزایش دمای هوای محیط در هوا گرم‌کن خورشیدی از سطح جاذب زبر استفاده شده که زبری سطح تبادل حرارت موجب افزایش دمای هوای خروجی از هوا گرم‌کن می‌گردد. علاوه بر این، در این پژوهش، برای رسوب‌زدایی راحت‌تر و افزایش سطح تبادل حرارت در واحد رطوبت‌زن، از پکینگ‌های رندم استفاده شده است. همچنین، در مطالعه حاضر، سیکل آب

<sup>1</sup> Engineering Equation Solver

پاشش شده از بالای واحد رطوبت زنی تبادل جرم و حرارت می‌کند. عملیات رطوبت‌زنی هوا در اثر تماس مستقیم جریان‌های آب و هوا صورت می‌پذیرد که نیروی محرکه از فاز مایع به فاز گاز، اختلاف رطوبت مطلق است. معمولاً این فرایند به‌صورت جریان معکوس آب و هوا در حضور پکینگ موجود در واحد رطوبت زنی صورت می‌گیرد. هوای خروجی از واحد رطوبت زنی گرم و دارای رطوبت بالا می‌باشد. در واحد رطوبت‌گیر کندانسوری با لوله‌های مسی فین دار آلومینیومی وجود دارد و هوای مرطوب و گرم بر روی لوله‌های این کندانسور جریان پیدا می‌کند. آب سرد نیز در جهت معکوس هوا در داخل لوله‌ها جریان یافته و با بازیافت گرمای نهان چگالش، گرم می‌شود و هوا نیز دچار کاهش دما می‌شود. وقتی که مخلوط هوا و بخار آب از روی یک کندانسور عبور می‌کند و دمای سطح کندانسور از نقطه شبنم بخار موجود در مخلوط پایین‌تر باشد، در اثر چگالش بخار آب گرمای نهان آن آزاد شده و به سطح منتقل می‌گردد. همچنین، به‌علت اختلاف دمای مخلوط هوا و بخار و سطح کندانسور، حرارت محسوس ناشی از این اختلاف دما نیز به سطح کندانسور منتقل می‌گردد. از مجموع این حرارت‌ها نیز می‌توان جهت گرم کردن آب ورودی به منبع آب‌شور استفاده کرد. با این تبادل حرارت، آب تقطیر شده به‌عنوان آب شیرین از کندانسور خارج می‌شود. هوای خروجی از رطوبت‌گیر که رطوبت خود را بر اثر تبادل حرارت با آب سرد از دست داده است، از واحد رطوبت‌گیر خارج و به محیط برگشت داده می‌شود. همچنین، آب تبخیر نشده در واحد رطوبت‌گیر به منبع پوسته لوله برگشت داده می‌شود تا با گرم شدن مجدد از بالای واحد رطوبت زنی مجدداً پاشش شود. در نهایت به میزان آب تبخیر شده، به منبع کویلی آب اضافه می‌شود. علاوه بر این برای جلوگیری از بالا رفتن غلظت آب داخل منبع مقداری از آب خروجی واحد رطوبت زنی جدا و همان مقدار آب تازه جایگزین آن می‌شود.

### 3- مدل محاسباتی و معادلات حاکم

#### 3-1- آب گرم‌کن و هوا گرم‌کن خورشیدی

اگر  $I$  میزان تابش خورشید بر واحد سطح کلکتورها باشد، آن‌گاه میزان دریافت تشعشع خورشید بر واحد سطح صفحه جذب آب گرم‌کن و هوا گرم‌کن به صورت رابطه (1) می‌باشد [14].

$$S = I(\tau\alpha) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $(\tau\alpha)$  حاصل‌ضرب ضریب جذب صفحه جذب و ضریب عبور پوشش کلکتور می‌باشد. نرخ انرژی مفیدی دریافتی ( $Q_u$ ) توسط آب گرم‌کن و هوا گرم‌کن از رابطه (2) قابل محاسبه است [12].

$$Q_u = F_R A [I(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_{amb})] \quad (2)$$

این معادله به‌صورت گسترده برای به‌دست آوردن مقدار انرژی مفید خروجی از آب گرم‌کن و هوا گرم‌کن خورشیدی استفاده می‌گردد که در آن  $U_L$  ضریب اتلاف حرارت کلی و  $T_i$  دمای سیال ورودی به کلکتور می‌باشند.  $F_R$  به‌عنوان فاکتور برداشت حرارت کلکتور معرفی و توسط معادله (3) برای آب گرم‌کن و معادله (4) برای هوا گرم‌کن بیان می‌شود.

$$F_R = \frac{MC_p(T_{out} - T_{in})}{A[I\tau\alpha - U_L(T_i - T_{amb})]} \quad (3)$$

$$F_R = F_1 \times F_2 \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}} \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{C_p \dot{m}}{A_C U_L F_1} \quad (6)$$

بسته و سیکل هوا باز می‌باشد، در حالی که در کار ضامن و همکاران [6-8]، از سیکل بسته هوا و باز آب استفاده شده است. در حالت سیکل بسته آب، آب خروجی از واحد رطوبت زنی دوباره وارد منبع کویل‌دار شده و این کار باعث کاهش آب دور ریز می‌شود. در حالت سیکل باز آب، آب گرم خروجی از رطوبت زنی با دمای بالا از دستگاه خارج شده و باعث اتلاف زیاد آب شده و می‌توان از آن برای آب گرم مصرفی استفاده کرد، ولی میزان املاح آن زیاد است.

#### 2- شرح مسئله

آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی دارای سیکل‌های مختلف گردش آب و هوا نظیر آب بسته- هوا باز، آب بسته- هوا بسته، آب باز- هوا باز و آب باز-هوا بسته می‌باشند. در این مطالعه به دلیل کاهش مصرف آب، سیکل هوا به‌صورت باز و سیکل آب بسته اجرا شده است، زیرا در سیکل باز آب، آب خروجی از واحد رطوبت زنی به‌دلیل دمای بالا باید از دستگاه خارج شده و آب ورودی با دمای پایین به واحد رطوبت‌گیر به سیکل تزریق شود و این کار باعث هدر رفت زیاد آب و انرژی حرارتی موجود در آب می‌شود. در صورتی می‌توان این کار را انجام داد که آب خروجی به‌عنوان آب گرم مصرفی استفاده شود و یا به‌چاه تزریق، رودخانه، دریا و هر منبع دائم آب‌شور بازگردانده شود.

یک دستگاه آب‌شیرین‌کن به روش رطوبت زنی-رطوبت‌زدایی با سیکل باز هوا و بسته آب به‌طور کلی شامل بخش‌های اصلی از جمله واحد رطوبت زنی، واحد رطوبت زدا و واحد گرمایش آب و هوا (کلکتور و هوا گرم‌کن خورشیدی) می‌باشد. "شکل 1" نشان‌دهنده شماتیکی از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی با سیکل بسته آب و باز هوا است. آب تغذیه (آب‌شور، آب‌های جاری با سختی بالا و آب دریا) داخل پوسته منبع کویلی در اثر تبادل حرارت با آب گرم داخل کویل که از کلکتورهای صفحه تخت می‌آید، گرم می‌شود. در روش رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی فشار کاری در بخش‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی فشار اتمسفر است و به همین جهت دمای موردنیاز جهت تبخیر آب پایین‌تر از دمای جوش آب است. از این رو میزان انرژی حرارتی موردنیاز این روش بسیار کمتر از روش‌های دیگر شیرین‌سازی آب است و این میزان انرژی را می‌توان به‌صورت کامل از انرژی خورشید تأمین کرد. سپس، آب تغذیه گرم شده از قسمت بالا وارد واحد رطوبت زنی می‌شود. نظر به این‌که با افزایش دمای هوای ورودی به واحد رطوبت زنی، رطوبت نسبی آن کاهش و این پدیده موجب افزایش توان حمل آب توسط هوا در واحد رطوبت زنی می‌گردد، برای اولین بار در ایران از هوا گرم‌کن خورشیدی در این نوع آب‌شیرین‌کن جهت گرم کردن هوای محیط استفاده شده است. علاوه بر این، با افزایش دمای هوای ورودی به واحد رطوبت‌زنی، دمای آب خروجی از رطوبت‌زنی نیز افزایش پیدا می‌کند و با افزایش دمای آب خروجی از رطوبت‌زنی، به دلیل بسته بودن سیکل آب تغذیه، دمای آب ورودی به رطوبت‌زنی افزایش و این امر موجب افزایش میزان آب شیرین تولیدی می‌شود. همچنین، ساخت هوا گرم‌کن خورشیدی با سطح تبادل حرارت زیر انجام شده که موجب تبادل حرارت بیشتر و افزایش دمای هوای خروجی از هوا گرم‌کن می‌شود که این به نوبه خود با توجه به موارد ذکر شده موجب تولید آب شیرین بیشتر می‌گردد. زمانی که دمای هوا از 30 درجه سلسیوس به 80 درجه سلسیوس برسد قابلیت حمل بیش از 0.5 کیلوگرم بخار آب و حدود 670 کیلوکالری گرما را پیدا می‌کند. هوای خروجی هوا گرم‌کن از قسمت پایین واحد رطوبت زنی وارد می‌شود و با آب گرم و

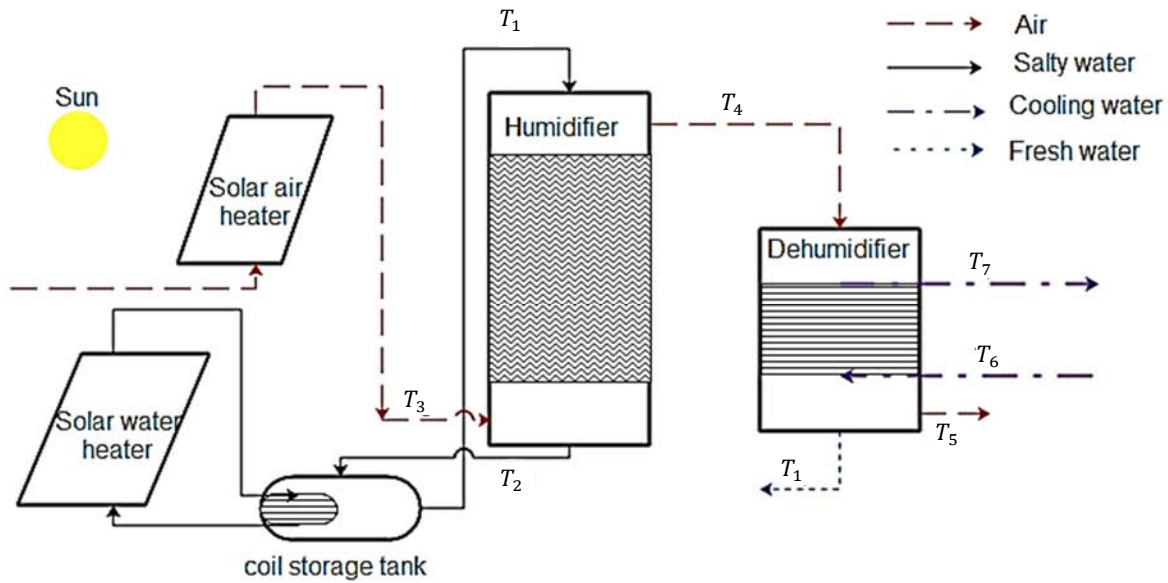


Fig. 1 Schematic view of the HD solar desalination system

شکل 1 شماتیکی از سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی رطوبت زنی - رطوبت زدایی

است.

$$\dot{m}_b = \dot{m}_w - \dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) \quad (10)$$

در واحد رطوبت‌گیر، هوای گرم و مرطوب با دبی جرمی  $\dot{m}_a$  و با آنتالپی  $h_4$  و همچنین آب سرد با دبی جرمی  $\dot{m}_w$  و دمای  $T_6$  وارد آن می‌شود. هوای خروجی از واحد رطوبت‌گیر در دمای  $T_5$  و اشباع است. دمای آب خروجی  $T_7$  می‌باشد که با توجه به فرایند تبادل حرارت، این دما از  $T_6$  بیشتر است.

با توجه به ناچیز فرض شدن انرژی اتلافی، می‌توان بالانس انرژی برای واحد رطوبت‌گیر را به صورت معادله (11) نوشت.

$$\dot{m}_a(h_4 - h_5) + \dot{m}_w C_{pw}(T_6 - T_7) - \dot{m}_{DH} C_{pw} T_{amb} = 0 \quad (11)$$

که در این رابطه  $\dot{m}_{DH}$  دبی جرمی آب شیرین تولید شده است و برابر با اختلاف میزان بخار آب موجود در هوای اشباع در ورودی و خروجی واحد رطوبت‌گیر می‌باشد.

$$\dot{m}_{DH} = \dot{m}_a(\omega_4 - \omega_5) \quad (12)$$

لازم به‌ذکر است که داده‌های ورودی (دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی در رطوبت‌زن و رطوبت‌گیر و همچنین دمای آب ورودی و خروجی در رطوبت‌گیر و رطوبت‌زن) برای شبیه‌سازی در این مطالعه، به‌صورت میانگین ساعتی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها می‌باشند.

#### 4- تشریح آب‌شیرین‌کن ساخته شده

آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی ساخته شده از چهار قسمت اصلی تشکیل شده است: 1- آب‌گرم‌کن خورشیدی 2- هوا گرم‌کن خورشیدی 3- واحد رطوبت زن 4- واحد رطوبت‌گیر. در ادامه، روش ساخت و نحوه کارکرد هر کدام از این قسمت‌ها تشریح می‌شود. "شکل 2" نمایی از دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی ساخته شده را نشان می‌دهد. این دستگاه در 30 کیلومتری شهر کرمان در محل دانشگاه تحصیلات تکمیلی نصب و راه‌اندازی شده است. طول و عرض جغرافیایی این محل به ترتیب برابر با  $57.29^0 E$  و  $30.06^0 N$  می‌باشند. در جدول 1 دستگاه ساخته شده در این مطالعه با سیستم آب شیرین‌کن ساخته شده توسط آقای

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2}} \quad (7)$$

#### 2-3- واحد رطوبت زنی - رطوبت زدایی

در این قسمت مدل محاسباتی بر مبنای قوانین ترمودینامیکی بقای جرم و انرژی در هر بخش از واحد آب‌شیرین‌کن پایه‌ریزی شده است. فرضیات اصلی استفاده شده برای به دست آوردن مدل محاسباتی مسئله به‌صورت زیر می‌باشند:

- فرایند در شرایط دائم فرض شده است.
  - از اتلافات حرارتی به محیط صرف‌نظر می‌شود.
  - هوا و بخار آب به صورت گاز کامل در نظر گرفته شده است.
  - تغییرات در انرژی جنبشی و پتانسیل نسبتاً ناچیز است.
  - در بالانس انرژی از توان مصرفی پمپ‌ها صرف‌نظر شده است.
  - دمای آب شیرین خروجی برابر با دمای محیط می‌باشد.
- معادله بقای انرژی، در واحدهای رطوبت‌زن و رطوبت‌گیر، به‌صورت معادله (8) تعریف می‌شود [15]:

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{loss} = 0 \quad (8)$$

که در آن  $\dot{Q}_{in}$ ،  $\dot{Q}_{out}$  و  $\dot{Q}_{loss}$  به ترتیب معرف نرخ انتقال حرارت ورودی، خروجی و اتلافی واحد می‌باشند.

در واحد رطوبت زن، هوای گرم و خشک با دبی جرمی  $\dot{m}_a$  و با آنتالپی  $h_3$  و همچنین آب گرم با دبی جرمی  $\dot{m}_w$  و دمای  $T_1$  وارد واحد رطوبت‌زن می‌شود. هوای خروجی در دمای  $T_4$  و اشباع است. همچنین، دمای آب خروجی  $T_2$  می‌باشد که با توجه به فرایند تبادل حرارت، این دما از  $T_1$  کمتر است.

با توجه به ناچیز فرض شدن انرژی اتلافی، می‌توان معادله (8) را به صورت معادله (9) برای واحد رطوبت زن باز نویسی کرد.

$$(\dot{m}_a h_3 + \dot{m}_w C_{pw} T_1) - (\dot{m}_b C_{pw} T_2 + \dot{m}_a h_4) = 0 \quad (9)$$

علاوه بر این، دبی جرمی آب‌شور خروجی از پایین واحد رطوبت زن  $\dot{m}_b$  برابر با اختلاف آب‌شور اسپری شده و بخار آب خارج شده توسط هوای اشباع

پلی‌پروپیلن<sup>1</sup> و به‌صورت رندم با ابعاد 2 اینچ به در یک حجم 0.4 مترمکعب استفاده شده است. مزیت استفاده از پکینگ های رندم، افزایش سطح تبادل حرارت بین آب و هوا در واحد رطوبت‌زن و قابل استفاده بودن در هر مقطع می‌باشد. همچنین، این پکینگ‌ها باعث رسوب زدایی و کارکرد بهتر در دماهای بالا می‌گردند که این امر موجب افزایش عملکرد سیستم در دراز مدت می‌شود. برای اسپری کردن آب‌شور گرم از بالای برج، از مه پاش استفاده شده است. همچنین، آب‌شور گرم شده با استفاده از یک پمپ خطی از بالای برج توسط مه پاش‌ها بر روی پکینگ‌ها پاشش می‌شود. پایه واحد رطوبت زن با استفاده از پروفیل 2x3 سانتی‌متری، نبشی 3 سانتی‌متری و تسمه ساخته شده است. ارتفاع پایه از بالاترین نقطه منبع بالاتر می‌باشد تا آب‌شور تبخیر نشده به‌صورت ثقلی و بدون استفاده از پمپ وارد منبع شود. برای جلوگیری از انتقال حرارت از دیواره‌های و کف واحد رطوبت زن، بدنه این واحد با استفاده از عایق الاستومری با روکش آلومینیومی عایق‌بندی شده تا حداقل انتقال حرارت و را داشته باشد.

#### 4-4- واحد رطوبت‌گیر

یکی دیگر از واحدهای اصلی در آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساخته شده، واحد رطوبت‌گیر می‌باشد. واحد رطوبت‌گیر با ابعاد 30x30 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر از ورق گالوانیزه 0.6 میلی‌متر ساخته شده است. برای ورودی و خروجی هوا از لوله ای به قطر 15 سانتی‌متر و برای خروجی آب شیرین از بوش 1/2 اینچی گالوانیزه استفاده شده است. آب‌بندی و هوابندی این لوله‌ها توسط جوش کاربیت انجام شده است. کندانسور این واحد رطوبت‌گیر از لوله‌های مسی فین دار آلومینیومی با طول 25 سانتی‌متر، به‌صورت بلوکی با ابعاد تقریبی 25x25 سانتی‌متر ساخته شده است. پایه نگهدارنده واحد رطوبت‌گیر نیز از پروفیل مستطیلی شکل با ابعاد 2x2، نبشی 2 سانتی‌متری و تسمه ساخته شده است. برای جلوگیری از انتقال حرارت از دیواره‌های واحد رطوبت‌گیر، بدنه این واحد با استفاده از عایق الاستومری با روکش آلومینیومی عایق‌بندی شده تا حداقل انتقال حرارت را با محیط اطراف داشته باشد. ضمناً، نظر به ظرفیت پایین این آب شیرین‌کن‌ها و استفاده از آن‌ها در مناطق

**جدول 1** مقایسه بین مشخصات سیستم ساخته شده در پژوهش حاضر با واحد ساخته شده توسط ضامن و همکاران

**Table 1** Comparison between characteristics of the present constructed system and that by Zamen et al. [8]

مشخصات رطوبت‌زن	ضامن و همکاران [8]	پژوهش حاضر
مشخصات رطوبت‌زن	PMMA <sup>2</sup>	ورق گالوانیزه
مشخصات پکینگ	جنس پلی پرو پلین به‌صورت بلوکی شکل	جنس پلی پرو پلین به‌صورت رندم
مشخصات رطوبت‌گیر	PMMA	ورق گالوانیزه
مشخصات کندانسور	لوله مسی با فین آلومینیوم	لوله مسی با فین آلومینیوم
ابعاد رطوبت‌زن (m)	0.32x0.42x3	0.5x0.8x2
ابعاد پکینگ (m)	0.3x0.4x2.4	0.5x0.8x1
ابعاد رطوبت‌گیر (m)	0.3x0.42x3	0.3x0.3x0.6
ابعاد کندانسور (m)	0.28x0.4x1.96	0.25x0.25x0.25
سطح گرمایش آب (m <sup>2</sup> )	28	6
سطح گرمایش هوا (m <sup>2</sup> )	-	2.8
میزان آب شیرین (Lit/h)	10	2.4

<sup>1</sup> Poly Propylene (P.P)

<sup>2</sup> Poly Methyl Meta Acrylate

ضامن و همکاران مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول نیز ملاحظه می‌شود در سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی ساخته شده در مطالعه حاضر، گرمایش هوا با استفاده از یک دستگاه هوا گرم کن خورشیدی ساخته شده توسط محققان انجام پذیرفته، در حالی که در سایر پژوهش‌ها از هوا گرم‌کن خورشیدی استفاده نشده است.

#### 1-4- سیستم خورشیدی تأمین آب تغذیه گرم

در این پژوهش، برای گرم کردن آب تغذیه از سه کلکتور صفحه تخت استفاده شده است. پایه‌های این کلکتورها از پروفیل با مقطع مربعی 3x3، نبشی 3 و تسمه، ساخته شده‌اند. برخلاف پژوهش‌های قبلی، آب تغذیه (شور) با عبور از لوله‌های کندانسور پیش‌گرم نشده و گرمایش آن با استفاده از سیستم گرمایش آب خورشیدی غیر مستقیم و با کمک منبع کویل‌دار انجام شده است. در سیستم گرمایش خورشیدی، آب گرم شده توسط کلکتورها در یک سیکل بسته توسط یک پمپ سیرکولاتور بین منبع کویلی افقی به ظرفیت 300 Lit و کلکتورهای به گردش درمی‌آید و حرارت خود را به آب تغذیه که در پوسته این منبع کویلی قرار دارد منتقل می‌کند. پمپ سیرکولاتور فرمان روشن و خاموش شدن را از یک کنترلر دریافت می‌کند و لوله‌های استفاده شده بین منبع کویلی و کلکتورهای خورشیدی از جنس گالوانیزه با قطر 3/4 اینچ می‌باشند.

#### 2-4- هوا گرم‌کن خورشیدی

همان‌طور که گفته شد برای گرم کردن هوای ورودی به دستگاه آب‌شیرین‌کن از هوا گرم‌کن خورشیدی استفاده می‌شود. قاب کلی این دستگاه از ورق گالوانیزه به ضخامت 0.6 میلی‌متر با ابعاد 280x130 سانتی‌متر و ارتفاع 20 سانتی‌متر ساخته شده است. در ابتدا و انتهای این قاب 10 سوراخ به قطر 10 سانتی‌متر ایجاد و لوله‌های آلومینیومی اعطاف‌پذیر در این سوراخ‌ها جانمایی شده‌اند تا هوای ورودی از داخل لوله‌های آلومینیومی عبور کند. برای جمع‌آوری هوای گرم خارج‌شده از لوله‌ها و ورود به فن از یک محفظه خروجی استفاده شده است. ابعاد محفظه خروجی 20x130 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر می‌باشد. با وجود این محفظه، فن مکنده از لوله‌ها فاصله خواهد داشت و دبی جریان داخل لوله‌ها تقریباً یکسان خواهد بود. پایه نگهدارنده از پروفیل مستطیلی 2x3 سانتی‌متری، نبشی 3 سانتی‌متری و تسمه ساخته شده است. پایه نگهدارنده با شیب 30 درجه (عرض جغرافیایی ماهان) ساخته شد. برای جلوگیری از افت حرارتی از پایین و دیواره‌های هوا گرم‌کن، از عایق پشم‌شیشه استفاده شده و همچنین برای جلوگیری از افت حرارت در محفظه خروجی از عایق الاستومری با روکش آلومینیومی استفاده شده است. قطر فن موجود در این مطالعه 20 سانتی‌متر بوده و این فن دارای پره‌های فلزی برای استفاده در دماهای بالا می‌باشد.

#### 3-4- واحد رطوبت زن

یکی از اصلی‌ترین واحدهای سیستم آب شیرین‌کن، واحد رطوبت زن می‌باشد. ساخت واحد رطوبت زن با ابعاد 80x50 سانتی‌متری و ارتفاع 200 سانتی‌متری با ورق گالوانیزه 0.6 میلی‌متر انجام شد. برای ورود و خروج هوا از لوله‌هایی با جنس گالوانیزه و قطر 15 سانتی‌متر و برای ورودی و خروجی آب نیز از بوش 1/2 اینچی گالوانیزه استفاده شده است، علاوه بر این، برای آب‌بندی و هوابندی این لوله‌ها از جوش کاربیت استفاده شده است. برای افزایش سطح تبادل حرارت و تبادل جرم از پکینگ‌هایی با جنس



Fig. 2 A view of the manufactured solar humidification-dehumidification desalination system

شکل 2 نمایی از سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت زنی-رطوبت زدایی خورشیدی ساخته شده

کمک شایانی به بهبود عملکرد دستگاه می‌نماید که در این پژوهش به آن پرداخته نشده است.

در ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در روز 30 تیرماه به صورت ساعتی باهم مقایسه و در "جدول 2" گزارش شده‌اند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی تطابق خوبی را مخصوصاً در دماهای بالا نشان می‌دهد.

#### 5-2- عملکرد روزانه دستگاه

عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن در روز 30 تیرماه از ساعت 8 صبح تا ساعت 7

جدول 2 مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی سیستم آب‌شیرین‌کن

Table 2 Comparison between simulation and experimental results of the desalination system

ساعت	شبیه‌سازی	آزمایش	درصد خطا
9	0.95	0.85	10.5
10	1.39	1.3	6.4
11	1.72	1.6	6.9
12	1.93	1.85	4.1
13	2.18	2.1	3.6
14	2.47	2.41	2.4
15	2.5	2.4	4
16	2.27	2.2	0.3
17	2.2	2.1	4.5
18	1.81	1.7	6
19	1.41	1.3	7.8

روستایی، عمدتاً از آب چاه شور به عنوان آب تغذیه استفاده می‌گردد و از آن‌جا که دسترسی به آب چاه در محل آزمایش (دانشگاه) مقدور نبوده، از آب چیلر برای شبیه‌سازی آب چاه استفاده شده است. لازم به ذکر است که دمای آب چیلر در محدوده دمایی آب چاه قرار دارد و استفاده از آن بر واقعیت منطبق است.

#### 5- نتایج

پس از ساخت آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت زنی-رطوبت زدایی، این دستگاه مورد آزمایش قرار گرفت. دستگاه‌های استفاده‌شده در اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در آب‌شیرین‌کن خورشیدی عبارت‌اند از: 1- تشعشع سنخ 2- ترموکوپل 3- ترموگراف دما و رطوبت 4- سرعت‌سنج هوا در این قسمت به تحلیل نتایج حاصل از آزمایش پرداخته می‌شود.

#### 5-1- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

نظر به این‌که پس از ساخت و آزمایش دستگاه آب‌شیرین‌کن، بررسی عملکرد دستگاه در سایر حالت‌ها نیز مدنظر می‌باشد و از آن‌جا بررسی عملکرد دستگاه آب‌شیرین‌کن در تمام شرایط وقت‌گیر و هزینه‌بردار است، لذا با استفاده از شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن با داده‌های تجربی، می‌توان عملکرد سیستم را در شرایط دیگر نیز شبیه‌سازی نمود. داده‌های استفاده‌شده در این شبیه‌سازی براساس پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها می‌باشند. شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه صرفاً، یک شبیه‌سازی ترمودینامیکی می‌باشد که روابط کلی آن در مراجع نیز ذکر گردیده است. همچنین، نرم افزار مورد استفاده در شبیه‌سازی، نرم‌افزار EES می‌باشد. ضمناً، "شکل 3" فلوجارت شبیه‌سازی سیستم آب‌شیرین‌کن را نشان می‌دهد لازم به ذکر است که شبیه‌سازی از دیدگاه انتقال حرارت و دینامیک سیالات محاسباتی

با توجه به میزان تابش، دما و دبی آب و هوا ورودی به رطوبت‌گیر و رطوبت زن میزان آب تولیدشده دستگاه در روز 30 تیرماه به صورت "شکل 5" می‌باشد. در این شکل، میزان تولید آب شیرین خروجی از نمونه آزمایشگاهی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت زنی - رطوبت زدایی را به صورت ساعتی و تجمعی مشاهده می‌کنید. میزان تولید آب شیرین در روز حدود 20 لیتر می‌باشد که خواص این آب نزدیک به آب مقطر می‌باشد و برای قابل شرب شدن این آب باید مقداری املاح به آن اضافه گردد. همچنین، میزان آب شیرین تولیدشده در ساعات مختلف متغیر است که بیشینه مقدار آن 2.5 لیتر در ساعت می‌باشد.

**3-5- تأثیر دمای آب و هوای به ورودی رطوبت زن بر عملکرد سیستم**  
 برای بررسی تأثیر دمای آب و هوای ورودی به رطوبت‌زن، دستگاه در روز 30 خرداد ماه همراه با کلکتورهای خورشیدی و هوا گرم‌کن خورشیدی و در روز 27 تیرماه بدون استفاده از کلکتورهای خورشیدی، با استفاده از هوا گرم‌کن خورشیدی و در روز 12 تیرماه بدون استفاده از هوا گرم‌کن خورشیدی، با استفاده از کلکتورهای خورشیدی مورد آزمایش قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها پارامترهای قابل تنظیم یکسان بوده است. دبی آب ورودی به رطوبت زن 0.1 kg/s و دبی هوای ورودی به رطوبت‌زن نیز 0.14 kg/s و همچنین آب ورودی به رطوبت‌گیر آب چیلر بوده است. لازم به ذکر است که در این سه روز میزان تابش خورشید نسبتاً یکسان بوده است.  
 در "شکل 6" دمای آب ورودی به رطوبت زن را در ساعات مختلف مشاهده می‌کنید. "شکل 7" نیز دمای هوای ورودی به رطوبت زن را در طول آزمایش برای سه حالت مورد بررسی، نشان می‌دهد.

در حالت بدون و با استفاده از هوا گرم‌کن خورشیدی در ساعت شروع کار دستگاه، دماها یکسان بوده است و در طول انجام آزمایش در حالت بدون استفاده از هوا گرم‌کن به دلیل پایین بودن دمای هوای ورودی، دمای آب خروجی از رطوبت‌گیر که با هوا تبادل حرارت انجام داده است کاهش پیدا می‌کند و با توجه به بسته بودن سیکل آب، دمای آب ورودی به رطوبت زن در طول آزمایش دچار کاهش شده است. "شکل 8" بیانگر میزان آب تولید شده تجمعی در طول زمان آزمایش‌های مذکور می‌باشد. به دلیل دماهای مختلف آب و هوای ورودی به رطوبت‌زن میزان آب تولید شده نیز در حالت‌های بدون آب گرم‌کن - با هوا گرم‌کن، با آب گرم‌کن - بدون هوا گرم‌کن و

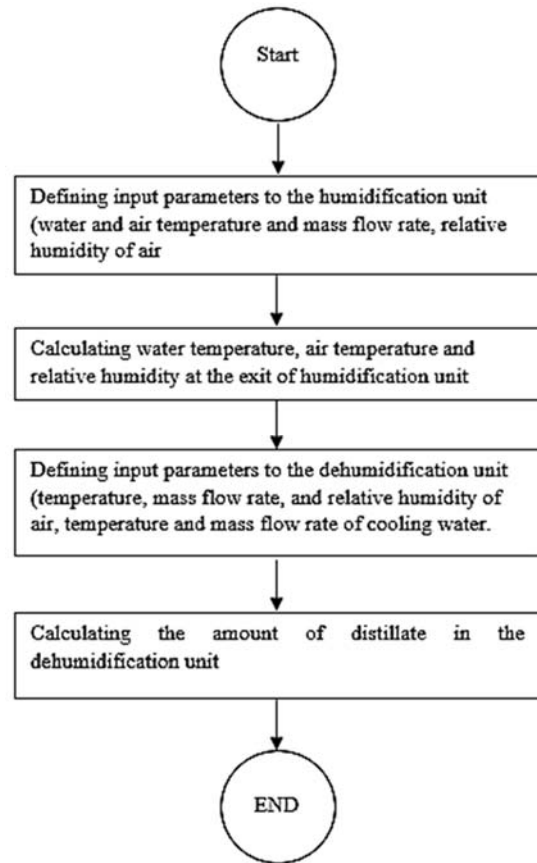


Fig. 3 Flowchart for simulation of the desalination system

شکل 3 فلوچارت شبیه‌سازی سیستم آب شیرین‌کن

عصر مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش دبی آب ورودی به رطوبت‌زن 0.1 kg/s و همچنین دبی هوا 0.14 kg/s بوده است. با توجه به تابش متغیر خورشید در ساعات مختلف، دمای آب ورودی به رطوبت‌زن نیز متفاوت خواهد بود. دمای ورودی به رطوبت‌گیر یا همان دمای آب چیلر بین دمای 14 تا 17 درجه سلسیوس متغیر است که برای شبیه‌سازی دمای آب چاه مناسب می‌باشد. "شکل 4" نشان‌دهنده دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر و رطوبت زن، در ساعات مختلف می‌باشد.

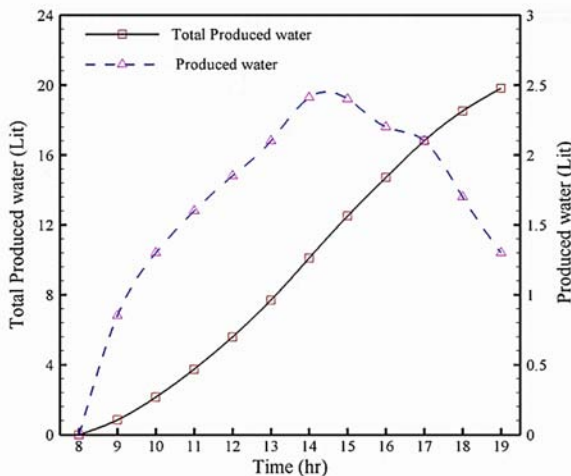


Fig. 5 Hourly and cumulative fresh water produced

شکل 5 آب شیرین تولید شده به صورت ساعتی و تجمعی

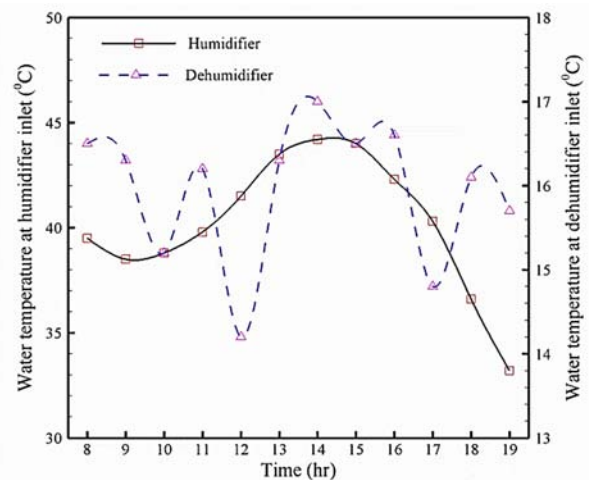


Fig. 4 Variation of inlet water temperature to humidifier and dehumidifier

شکل 4 تغییرات دمای آب ورودی به رطوبت زن و رطوبت‌گیر

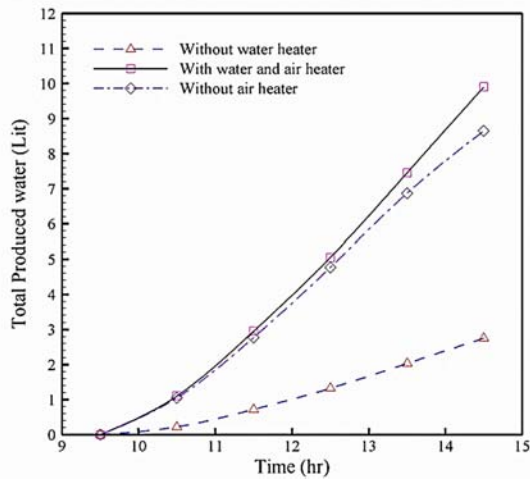


Fig. 8 The cumulative fresh water produced in three experiments

شکل 8 میزان آب شیرین تولیدشده به‌صورت تجمعی در سه آزمایش

رطوبت‌گیر مورد آزمایش قرار گرفته است. در روز 17 خردادماه آب ورودی به رطوبت‌گیر، آب چیلر و در روز 12 خردادماه، آب شهر بوده است. پارامترهای قابل تنظیم را در طی این آزمایش‌ها ثابت گرفته شده‌اند. دبی آب ورودی به رطوبت‌زن 0.08 kg/s و دبی هوای ورودی رطوبت‌زن 0.14 kg/s بوده است. برای مقایسه این دو آزمایش تشعشع محیط نسبتاً یکسان بوده است. میانگین دمای آب و هوای ورودی به رطوبت‌زن به ترتیب 42 و 60 درجه سلسیوس بوده است. "شکل 9" دمای آب خنک‌کننده در واحد رطوبت‌گیر را نشان می‌دهد. در حالت استفاده از آب چیلر، دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر نزدیک به دمای آب چاه می‌باشد، دمای پایین آب در خنک‌کاری باعث می‌شود که اختلاف دمای آب و هوا در داخل رطوبت‌گیر افزایش پیدا کند و در نتیجه میزان انتقال حرارت در این واحد افزایش پیدا کند. با افزایش انتقال حرارت بین آب و هوا، دمای هوای خروجی در این حالت کمتر خواهد شد. با کاهش هوای خروجی از واحد رطوبت‌زن میزان رطوبت موجود در هوا نیز کاهش پیدا خواهد کرد. این کاهش رطوبت در حقیقت آب شیرین تولید شده است. "شکل 10" نشان‌دهنده مقایسه آب تولید شده در دو حالت مذکور است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تأثیر آب چیلر بر میزان آب شیرین تولید شده مشهود است.

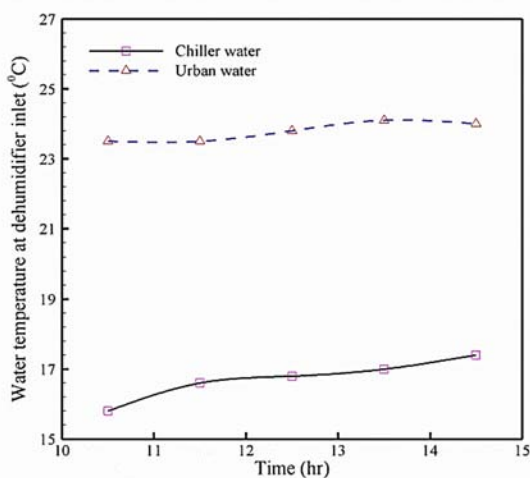


Fig. 9 Variation of inlet water temperature to the dehumidifier

شکل 9 تغییرات دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر

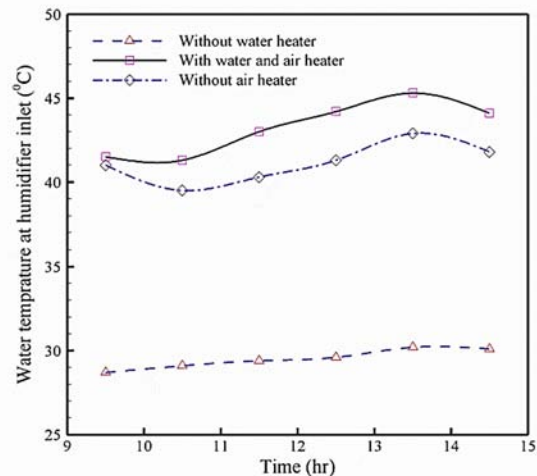


Fig. 6 Hourly variation of inlet water temperature to humidifier in three experiments

شکل 6 تغییرات ساعتی دمای آب ورودی به رطوبت‌زن در سه آزمایش

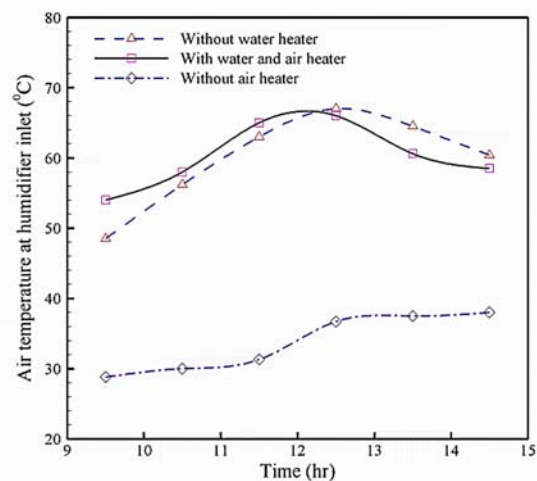


Fig. 7 Hourly variation of inlet air temperature to humidifier in three experiments

شکل 7 تغییرات ساعتی دمای هوای ورودی به رطوبت‌زن در سه آزمایش

با استفاده از هردو متغیر است. همین‌طور که مشاهده می‌کنید تأثیر دمای هوا نسبت به دمای آب بر روی میزان آب شیرین تولید شده کمتر است، چون ظرفیت گرمایی ویژه آب نسبت به هوا بیشتر است و تبادل حرارت در واحد رطوبت‌زن در شرایط یکسان با افزایش یک درجه دمای آب نسبت به افزایش یک درجه دمای هوا بیشتر خواهد بود.

با افزایش دمای هوا و آب ورودی به رطوبت‌زن، تبادل حرارت در واحد رطوبت‌زن افزایش می‌یابد، و دمای هوای خروجی از رطوبت‌زن نیز افزایش پیدا خواهد کرد، با افزایش دمای هوای خروجی رطوبت‌زن، میزان رطوبت موجود در هوا افزایش پیدا خواهد کرد. از طرفی دمای نقطه شبنم هوای گرم و مرطوب نیز افزایش می‌یابد، و در دماهای بالاتر می‌تواند تقطیر صورت پذیرد. در نتیجه بهترین حالت برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی استفاده هم‌زمان از آب گرم‌کن و هوا گرم‌کن می‌باشد.

#### 4-5- تأثیر دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر بر عملکرد سیستم

برای بررسی تأثیر دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر، دستگاه در دو حالت استفاده از آب چیلر و همچنین آب شهر به‌عنوان آب ورودی به واحد



رطوبت گیر با افزایش دبی از  $0.04 \text{ kg/s}$  تا  $0.12 \text{ kg/s}$  کاهش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر دبی تا  $0.2 \text{ kg/s}$  تفاوت محسوسی در این اختلاف دما مشاهده نمی‌شود.

از طرفی با افزایش دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر در شرایط یکسان، مقدار انتقال حرارت بین آب و هوا افزایش پیدا خواهد کرد. با کاهش حرارت، هوای خروجی از رطوبت‌گیر به دمای پایین‌تری می‌رسد. با کاهش دمای هوای خروجی رطوبت‌گیر، میزان رطوبت‌گیری در کندانسور بیشتر خواهد شد و در نتیجه میزان آب تولیدی بیشتر خواهد شد. از طرفی با کاهش دبی، دمای آب خروجی رطوبت‌گیر افزایش پیدا می‌کند و این افزایش دما باعث می‌شود در لوله‌های بالایی کندانسور دمای آب زیادتر شود و مقدار انتقال حرارت و تقطیر آب کاهش پیدا می‌کند. افزایش دبی آب تا زمانی که بیشترین انتقال حرارت بین آب و هوا صورت پذیرد، مفید می‌باشد و بعد از آن به دلیل ثابت بودن میزان انتقال حرارت تأثیر چندانی بر عملکرد سیستم نخواهد داشت. "شکل 12" نشان‌دهنده میزان آب تولید شده در دبی‌های مختلف می‌باشد. با توجه به کندانسور استفاده شده، افزایش دبی از  $0.12 \text{ kg/s}$  به  $0.2 \text{ kg/s}$  تأثیری بر مقدار آب شیرین تولید شده ندارد.

### 6- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی ساخته، آزمایش و شبیه‌سازی گردید. با توجه پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم نظیر دمای آب و هوای ورودی به واحد رطوبت‌زن، بهترین عملکرد مربوط به استفاده هم‌زمان از آب گرم‌کن خورشیدی و هوا گرم‌کن خورشیدی می‌باشد. همچنین تأثیر دمای آب نسبت به هوا به دلیل سهم بیشتر آن در انتقال حرارت بیشتر است. زمانی که در دستگاه آب‌شیرین‌کن، از کلکتورهای خورشیدی برای گرمایش آب استفاده شد، تولید آب شیرین به میزان 72 درصد افزایش یافته است. از طرفی، استفاده از هوا گرم‌کن منجر به افزایش تولید آب شیرین 12 درصد نسبت به حالت بدون استفاده از هوا گرم‌کن شد.

از طرفی با کاهش دمای آب ورودی به واحد رطوبت‌گیر و ثابت بودن مابقی پارامترها، نرخ انتقال حرارت بین آب و هوا افزایش می‌یابد. افزایش نرخ انتقال حرارت بین آب و هوای اشباع، افزایش میزان تولید آب را در پی خواهد داشت. در این آزمایش، سطح انتقال حرارت ثابت بوده و استفاده از آب چیلر در ورودی واحد رطوبت‌گیر افزایش 31 درصدی میزان آب تولید شده در طول ساعات آزمایش را به دنبال داشت.

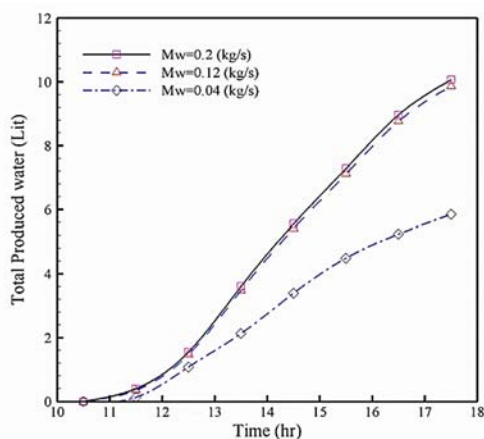


Fig. 12 The cumulative fresh water produced

شکل 12 میزان آب شیرین تولیدشده به صورت تجمعی

### 5-5- تأثیر دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر بر عملکرد سیستم

برای بررسی تأثیر دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر، دستگاه در روز 12 خردادماه با دبی آب ورودی رطوبت‌گیر  $0.2 \text{ kg/s}$  و در روز 9 خردادماه با دبی آب ورودی رطوبت‌گیر  $0.12 \text{ kg/s}$  و در روز 11 خردادماه با دبی آب ورودی رطوبت‌گیر  $0.04 \text{ kg/s}$  آزمایش شده است. پارامترهای قابل تنظیم در طول این آزمایش‌ها ثابت بودند. دبی آب ورودی به رطوبت‌زن  $0.08 \text{ kg/s}$  و دبی هوای ورودی به رطوبت‌زن نیز  $0.14 \text{ kg/s}$  بوده است. لازم به ذکر است که تمام آزمایش‌های انجام شده در این بخش با استفاده از آب شهر به‌عنوان آب خنک‌کن کندانسور واحد رطوبت‌گیر انجام شده است. در این آزمایش‌ها، مقدار تابش خورشید نسبتاً یکسان بوده است. دمای آب و هوای ورودی به رطوبت‌زن به‌طور میانگین، به ترتیب 41 و 55 درجه سلسیوس و دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر نیز 23.5 درجه سلسیوس بوده است.

با کاهش دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر در شرایط یکسان، دمای آب خروجی از رطوبت‌گیر افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در "شکل 11" مشاهده می‌شود، اختلاف دمای آب بین ورودی و خروجی کندانسور واحد

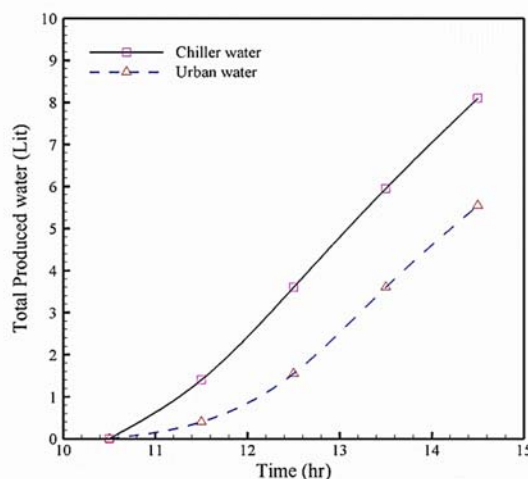


Fig. 10 The effect of inlet water temperature to the dehumidifier on the cumulative water produced

شکل 10 تأثیر دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر بر میزان تجمعی آب شیرین تولیدشده

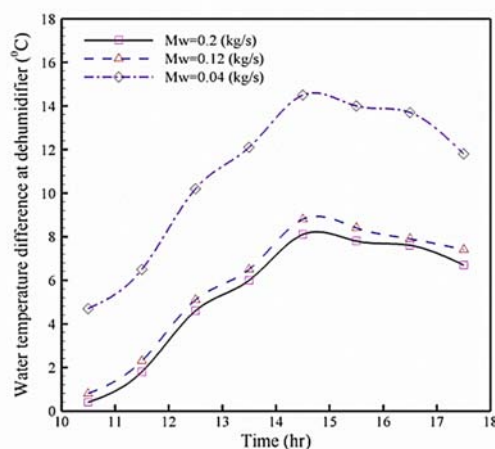


Fig. 11 Water temperature difference between dehumidifier inlet and outlet

شکل 11 اختلاف دمای آب ورودی و خروجی رطوبت‌گیر

خروجی out  
آب w

در پایان تأثیر دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده شد با افزایش دبی از 0.04 kg/s به 0.12 kg/s، میزان تولید آب شیرین به میزان 40 درصد افزایش پیدا کرده است و بعد از آن با افزایش دبی از 0.12 kg/s به 0.2 kg/s میزان تولید آب شیرین تنها 2 درصد افزایش پیدا کرده است. از آن‌جا که افزایش دبی باعث افزایش هزینه می‌شود، بهترین دبی آب برای این سه حالت آزمایش شده همان مقدار 0.12 kg/s می‌باشد.

به صورت خلاصه می‌توان نتایج مهم را به صورت زیر لیست کرد:

- افزایش دمای آب و هوای ورودی به رطوبت‌زن موجب افزایش میزان آب شیرین تولید شده می‌شود، اما با توجه به بالا بودن ظرفیت گرمایی ویژه آب نسبت به هوا، تأثیر افزایش دمای آب نسبت به دمای هوا بر میزان آب شیرین تولید شده بیشتر می‌باشد.
- کاهش دمای آب ورودی به رطوبت‌گیر به دلیل افزایش تبادل حرارت در واحد رطوبت‌گیر موجب افزایش میزان آب شیرین تولید شده می‌شود.
- افزایش دبی آب ورودی به رطوبت‌گیر به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت در واحد رطوبت‌گیر موجب افزایش آب شیرین تولید شده می‌شود، اما به دلیل ثابت بودن ابعاد واحد رطوبت‌گیر این افزایش دبی تا حدی باعث افزایش میزان آب شیرین شده و بعد از آن نسبتاً یکسان می‌باشد.

#### 7- فهرست علائم

$A$	مساحت سطح کلکتور ( $m^2$ )
$F_R$	فاکتور برداشت حرارت
$h$	آنتالپی ( $J/kg$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kg/s$ )
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت ( $W$ )
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )
$U_L$	ضریب اتلاف حرارت ( $W/m^2^{\circ}C$ )

#### زیرنویس‌ها

a	هوا
amb	محیط
b	آب شور خروجی رطوبت‌زن
in	ورودی
loss	اتلافی

#### 8- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان تحت قرارداد پژوهشی شماره 5276 انجام شده است و بدینوسیله مراتب تقدیر و تشکر اعلام می‌گردد.

#### 9- مراجع

- [1] N. Lior, *Advances in water desalination*, pp. 1.3-1.5, First Edition, New York: Wiley, 2012.
- [2] B. M. Hamieh, J. R. Beckman, Seawater desalination using dewvaporation technique: theoretical development and design evolution, *Desalination*, Vol. 195, No. 1, pp. 1-13, 2006.
- [3] E. Chafik, A new seawater desalination process using solar energy, *Desalination*, Vol. 153, No. 1, pp. 25-37, 2002.
- [4] G. Yuan, H. Zhang, Mathematical modeling of a closed circulation solar desalination unit with humidification-dehumidification, *Desalination*, Vol. 205, No. 1, pp. 156-162, 2007.
- [5] H. M. Qiblawey, F. Banat, Solar thermal desalination technologies, *Desalination*, Vol. 220, No. 1, pp. 633-644, 2008.
- [6] S. M. Soufari, M. Zamen, M. Amidpour, Performance Optimization of Humidification-Dehumidification Desalination Process Using Mathematical Programming, *Desalination*, Vol. 237, No. 2, pp. 305-317, 2009.
- [7] M. Zamen, M. Amidpour, S. M. Soufari, Cost Optimization of a Solar Humidification-Dehumidification Desalination Unit Using Mathematical Programming, *Desalination*, Vol. 239, No. 1, pp. 92-99, 2009.
- [8] S. M. Soufari, M. Zamen, M. Amidpour, Experimental validation of an optimized solar humidification-dehumidification desalination unit, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 6, No. 2, pp. 244-251, 2009.
- [9] T. Khademi-Nejad, H. Rahim-Zadeh, First and second law thermodynamics analysis of closed air and open water loops humidification and dehumidification desalination system, *Iranian Journal of Chemical and Chemical Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 69-76, 2015. (in Persian)
- [10] M. Zamen, N. Reza-Khani, M. Rajabi, M.A.A. Zinali Danaloo, Performance evaluation of combined solar domestic desalination-water heater system, *Iranian Journal of Chemical and Chemical Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 91-102, 2015. (in Persian)
- [11] A. S. Nafey, H. E. S. Fath, S. O. El-Helaby, A. M. Soliman, Solar desalination using humidification dehumidification processes. Part I. A numerical investigation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 7, pp. 1243-1261, 2004.
- [12] A. S. Nafey, H. E. S. Fath, S. O. El-Helaby, A. M. Soliman, Solar desalination using humidification dehumidification processes. Part II. A experimental investigation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 8, pp. 1263-1277, 2004.
- [13] E. Deniz, S. Cinar, Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification, *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, No. 1, pp. 12-19, 2016.
- [14] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering Of Thermal Processes*, pp. 6.280-6.283, Fourth Edition, New York: Wiley, 2013.
- [15] Y. A. Çengel, M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, pp. 14.726-14.732, Eighth Edition, McGraw-Hill Education, 2015.