

بررسی آزمایشگاهی اثر شیب پوشش شیشه ای با سطوح تخت و محدب صفحه جاذب در بازدهی آب شیرین کن خورشیدی

حمید رضا گشایشی*

سید سینا ادیبی طوسی

مهران رستمی

احسان جعفری

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

چکیده

در این مقاله نتایج آزمایشگاهی حاصل از بررسی اثر زاویه شیب پوشش شیشه‌ای بر عملکرد دو حالت هندسه آب شیرین کن خورشیدی در حالت تخت و محدب و میزان تولید آب مقطر ارائه شده است. شیب زوایای مورد مطالعه ۲۵ درجه، ۲۷.۵ درجه، ۳۰ درجه، ۳۲.۵ درجه و ۳۵ درجه انتخاب شده است، درحالی که سایر پارامترهای طراحی ثابت مانده است. تحقیقات نشان داده که جمع‌کننده خورشیدی با صفحه جاذب محدب میزان تولید آب روزانه متوسط بالاتری در مقایسه با خروجی از جمع‌کننده خورشیدی با صفحه جاذب تخت را دارا می‌باشد. آزمایشات همچنین نشان داد که زاویه شیب اثر قابل توجهی بر عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی دارد. مقدار زاویه شیب ۳۲.۵ درجه است و زاویه شیب بیشتر باعث کاهش ضریب انتقال گرما می‌گردد. این نتایج را می‌توان برای اهداف طراحی مورد استفاده قرار داد و فرض رایج برای استفاده از زاویه‌های پایین تر برای بهینه سازی بهره‌وری را از بین می‌برد. در نهایت، از اطلاعات به دست آمده روابط تجربی جدیدی برای عدد ناسلت با توجه به سطوح صاف و محدب با زاویه شیب مختلف پوشش شیشه‌ای به دست آمد. **واژه‌های کلیدی:** آب شیرین کن خورشیدی، صفحات جاذب، زاویه شیب صفحات، بازدهی.

Experimental investigation on the effect of the slope of glass cover with flat and convex surfaces of absorber plate on the efficiency of the solar desalination

H. R. Goshayeshi

S. S. Adibi Toosi

M. Rostami

E. Jafari

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university, Mashhad, Iran

Abstract

In this paper, the experimental results from the study of the effect of the angle of the slope of glass cover on the performance of the two geometry of solar desalination with flat and convex plates under different amounts of distilled water are presented. The slope of the studied angles is selected to be 25°, 27.5°, 30°, 32.5° and 35° while the other design parameters remain constant. The results showed that a solar collector with a convex absorber plate has a higher average daily water production compared to the solar collector with a flat absorber plate. Experiments also showed that the angle of the slope has a significant effect on the performance of the solar desalination system. The best slope is 32.5° and the larger angles cause to decrease in the heat transfer coefficient. These results can be used for design purposes and eliminate the common assumption of using lower angles to optimize productivity. Finally, from the obtained information, new experimental relations are obtained for the Nusselt number for the flat and convex surfaces with different slope angles of the glass cover.

Keywords: Solar desalination, absorber plates, angle of slope of the plates, efficiency.

۱- مقدمه

آب شیرین کن به طریق مختلف می‌باشد [۳]. فرآیند شیرین سازی آب بایستی دارای ویژگی‌هایی نظیر انرژی پایین، کیفیت و راندمان بالا، سهولت استفاده و پاک بودن انرژی مورد استفاده برای شیرین کردن آب و ... باشد. بنابراین با توجه به ویژگی‌های نامبرده، روش تقطیری می‌تواند روشی مناسب برای شیرین کردن آب باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران در نیم کره شمالی و قرار گرفتن کشورمان بر روی کمربند خورشیدی جهان، می‌توان آن را یکی از بهترین مناطق برای استفاده از انرژی خورشیدی در جهان دانست. هر روز با صنعتی شدن و رشد جمعیت آب قابل شرب با درخواست قابل توجهی مواجه شده است. استخراج آب‌های زیرزمینی با سرعت بیشتری نسبت به بارگیری طبیعی آن اتفاق می‌افتد، که منجر به تخریب آب‌های زیرزمینی می‌شود. تخمین زده شده است کمبود آب یک چهارم از جمعیت جهان را

شرایط خشکسالی در خاورمیانه به ویژه ایران منجر به کاهش دسترسی به آب آشامیدنی گردیده است و به نظر می‌رسد که این شرایط بحرانی مناطق مذکور را با مشکلات عدیده اقتصادی، اجتماعی و ... رو برو خواهد کرد [۱]. بررسی انواع فناوری‌های انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع وسیع و تجدید پذیر نشان می‌دهد که تبدیل و استفاده از انرژی خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تنها ۱ درصد از کل آب در این سیاره آب شیرین است که برای استفاده در دسترس انسان است [۲] با توجه به حجم بالای آب‌های شور، باید به دنبال روش‌های مناسب جهت شیرین نمودن آب‌های شور بود. روش متداولی که برای تهیه آب شیرین به کار گرفته می‌شود استفاده از دستگاه‌های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: goshayeshi1655@mshdiau.ac.ir

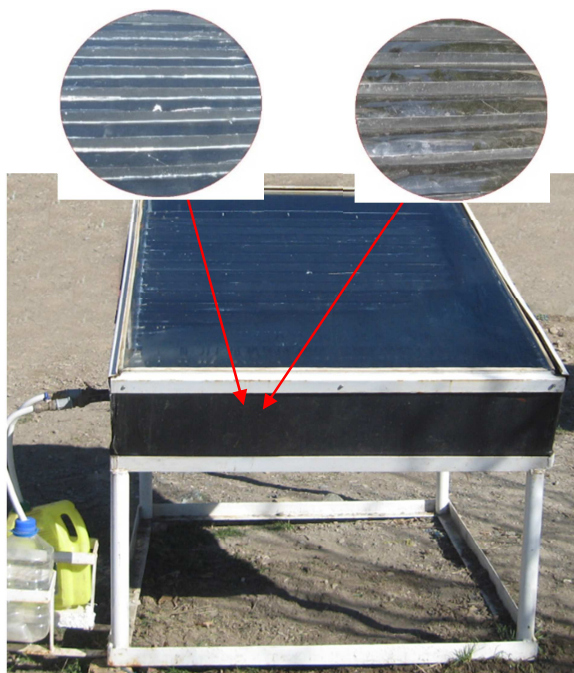
تا پایان سال ۲۰۲۵ تحت تاثیر قرار می‌دهد و حداقل دو سوم از جمعیت جهان با تنش مربوط به آب مواجه می‌شوند [۴]. در پایان سال ۲۰۳۰ تخمین زده شده‌است که نیمی از جمعیت جهان با تنش آب مواجه خواهد شد [۵]. آب شیرین کن‌های خورشیدی راه حلی برای دسترسی به آب شیرین در مناطق خشک است [۶-۸]. آب شیرین کن‌های خورشیدی وسایلی هستند که به منظور نمک زدایی آب‌های شور مورد استفاده قرار می‌گیرند. دستگاه از حوضچه و یک روکش (پوشش) شیشه‌ای یا پلاستیکی تشکیل شده است، پوشش شیشه‌ای در بالای صفحه و یک استخر آب در پایین آن با عمق نسبتاً کم قرار دارد. کف استخر جهت جذب بیشینه امواج خورشید دارای رنگ مشکی است آب تبخیر شده به سطح داخلی پوشش شیشه‌ای برخورد می‌کند و چگالیده می‌شود. سپس آب چگالیده شده جمع‌آوری می‌گردد [۱۰ و ۹]. آب شیرین کن‌های خورشیدی جهت تامین آب آشامیدنی در مناطق ساحلی به عنوان یک روش جایگزین استفاده می‌شود. عملکرد این دستگاه به میزان تابش خورشیدی جهت نمک زدایی آب بستگی دارد [۱۱]. در مقایسه با فرآیند آب شیرین کن‌های دیگر که غالباً نیاز به استفاده از برق دارند، آب شیرین کن‌های ساکن خورشیدی می‌توانند آب آشامیدنی ارزان برای جوامع کوچک فراهم کنند [۱۲] همچنین، پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که چون آب شیرین کن خورشیدی می‌تواند از انرژی آزاد و در دسترس خورشید برای نمک زدایی آب استفاده کند، بنابراین انرژی سبز یا به عبارت دیگر یک فرآیند انرژی سازگار با محیط زیست محسوب می‌شود [۱۳]. مزایای استفاده از آب شیرین کن‌های خورشیدی در مقایسه با سایر سیستم‌های تقطیر قابل توجه است. آب شیرین کن‌های خورشیدی دارای قطعات متحرک نیستند، بنابراین به راحتی تعمیر و نگهداری و قابل ساخت می‌باشند. [۱۴] ساخت و تعمیر سیستم‌های خورشیدی پیچیده و بومی نیست؛ کارگران غیر متخصص می‌توانند با استفاده از مصالح ساختمانی موجود (شیشه و غیره) ساخت و تعمیر آن را انجام دهند. سرمایه لازم برای آب شیرین کن‌های خورشیدی هنوز ناچیز است و تولید زیاده کمی دارد همچنین بهره‌وری آن در مورد تقطیر آب بسیار زیاد است، حتی زمانی که از آب دریا تغذیه شود. [۱۵] برخی از محققان از رویکردهای تجربی استفاده کردند [۱۶-۱۸] و دیگران از رویکردهای ریاضی یا عددی استفاده نمودند [۱۹-۲۱]. برای رسیدن به بهترین طرح برای آب شیرین کن‌های خورشیدی از بررسی مقالات اولیه به این نتیجه می‌توان رسید که پارامترهایی که در طراحی اولیه تأثیر قابل توجهی در سیستم خورشیدی دارند به شرح زیر هستند:

- ۱) شدت تابش خورشید [۲۳، ۲۲]
- ۲) دمای محیط [۲۵، ۲۴]
- ۳) ضخامت شیشه [۲۷، ۲۶]
- ۴) سرعت باد [۲۹، ۲۸]
- ۵) سطح آزاد آب [۳۱، ۳۰]
- ۶) سطح صفحه جاذب معمولی و متخلخل همراه با نانو و عمق آب شور [۳۳ و ۳۲، ۳۱، ۳۰]
- ۷) زاویه شیشه [۳۵، ۳۴]
- ۸) مواد تشکیل دهنده شیشه [۳۷، ۳۶]
- ۹) مایع مورد استفاده [۳۹، ۳۸]
- ۱۰) خنک سازی پوشش شیشه‌ای [۴۰]

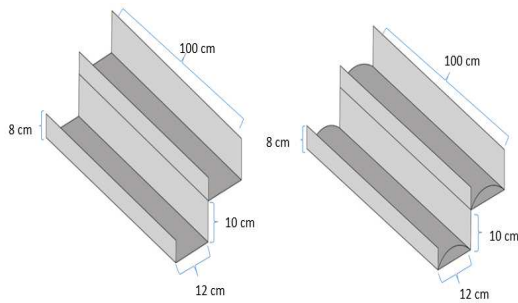
از میان متغیرهای ذکر شده در بالا، یکی از مهمترین پارامترها، زاویه شیب پوشش شیشه‌ای است که بر حرکت قطرات آب چگالیده شده در طول سطح داخلی پوشش تاثیر می‌گذارد. [۴۱، ۴۲] با این حال، اثر هندسه‌های مختلف جاذب در زاویه‌های مختلف زاویه پوشش شیشه‌ای نیاز به مطالعه بیشتر دارد، زیرا هنوز کاملاً مشخص نمی‌باشد. به همین دلیل دو هندسه آب شیرین کن (نوع مسطح و محدب) ساخته شده‌اند و عملکرد آنها با یکدیگر در زوایای مختلف انحراف آنها مقایسه شده است. هدف اصلی این مقاله بررسی اثر زاویه شیب پوشش شیشه‌ای در بازده آب شیرین کن خورشیدی است و شناسایی یک زاویه شیب مناسب پوشش که بهینه ترین عملکرد روزانه را برای دو هندسه مورد مطالعه فراهم می‌کند. نتیجه این تحقیقات می‌تواند راهبردهای کاربردی برای ایجاد آب شیرین کن‌های خورشیدی بسیار کارآمد برای تامین آب آشامیدنی بیشتری در زمین‌های گرم و خشک پیدا کند.

۲- دستگاه تجربی

در شکل ۱ نمایی از هندسه مورد مطالعه و همچنین شبکه‌های مقاومت گرمایی مربوط به آب شیرین کن خورشیدی مورد نظر آورده شده است. واحد مورد تست شامل یک صفحه جاذب پله‌ای است که بر روی یک پایه فلزی ساخته شده و گزینه‌ای برای تغییر زاویه انحراف می‌باشد. صفحه جذب شده از ورق گالوانیزه ضخامت ۱ میلی‌متر و ۱۳۰۰ میلی‌متر طول و عرض ۱۰۰۰ میلی‌متر ساخته شده‌است که با رنگ سیاه رنگ آمیزی شده‌است.



الف) نمای بیرونی آب شیرین کن خورشیدی



شکل ۲- طرح سطوح مسطح و محدب مورد مطالعه.

جدول ۱ و ۲ خلاصه‌ای از مشخصات طراحی و هندسه سطح جاذب آب شیرین کن خورشیدی را به ترتیب ارائه می‌دهند.

جدول ۱- پارامترهای طراحی برای آب شیرین کن خورشیدی مورد مطالعه

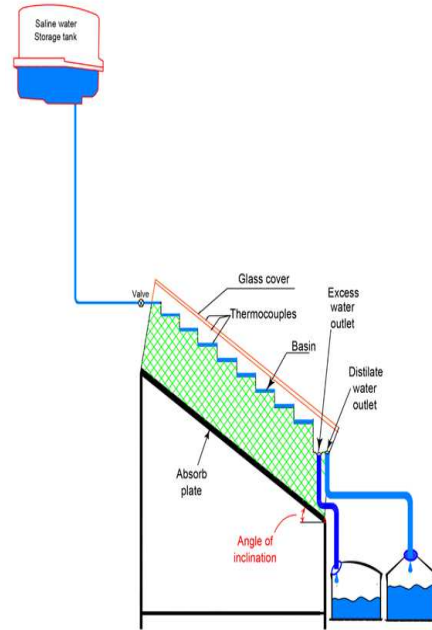
پارامترها	ابعاد
طول حوضچه	600 mm
عرض حوضچه	400 mm
ارتفاع حوضچه	2800 mm
زاویه انحراف	20°, 22.5°, 25°, 27.5°, 30°, 32.5°, 35°, 37.5°, 40°
طول پوشش شیشه ای	1300 mm
عرض پوشش شیشه ای	1000 mm
ضخامت پوشش شیشه ای	4 mm

جدول ۲- پارامترهای طراحی آب شیرین کن خورشیدی

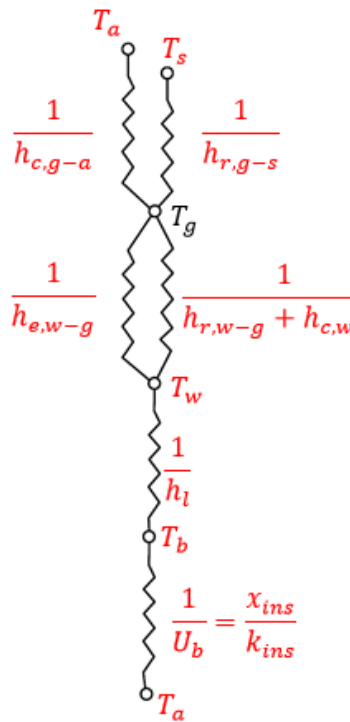
نوع آزمایش	عمق آب (mm)	ضخامت پوشش شیشه ای (mm)	هندسه صفحه جاذب
A	5	4	مسطح
B	5	4	محدب

همانطور که اشعه خورشید بر روی پوشش شیشه‌ای می‌تابد، آنها توسط صفحه جذب سیاه جذب می‌شوند. بر این اساس، آب شور در جریان روی صفحات جاذب پلکانی شروع به گرم شدن می‌کند و تبخیر آب زمانی که دمای داخل آن به دمای اشباع آب می‌رسد اتفاق می‌افتد. پوشش شیشه ای با یک لایه عایق پلاستیکی عایق بندی شده است تا از خروج بخار آب به محیط جلوگیری کند. آب جمع آوری شده به مخزن آب مقطر در پایین می‌ریزد و جمع آوری می‌شود. این کار توسط یک لوله است که در کنار واحد نصب شده است انجام می‌شود. تمام این مجموعه بر روی یک پایه فلزی شیب‌دار قرار می‌گیرد. آب شور اضافی از سمت صفحه جاذب به سمت مخزن آب شور جریان می‌یابد.

قابل توجه است که یکی از عواملی که بر نرخ تولید تأثیر می‌گذارد، شیب سقف است که تابعی از عرض جغرافیایی، زاویه تابش خورشید و فصول سال است [۴۴-۴۵]. برای شهر مشهد (ایران)، با عرض جغرافیایی ۳۶.۳۱ درجه [۴۶]، شار تابش خورشیدی در شکل ۳ برای یک روز معمولی در تابستان نمایش داده می‌شود که تمام طول روز را پوشش داده است (از طلوع خورشید و پایان دادن به آن در غروب خورشید) و همچنین تقریباً شب را نیز در بر می‌گیرد.



ب) طرحواره



ج) شبکه مقاومت گرمایی

شکل ۱- هندسه مورد مطالعه

شکل ۲ طرح ترسیمی صفحات جذبی خورشیدی تخت و محدب را نشان می‌دهد. فضای بین جعبه و صفحه جذب پله با پلی اورتان فوم (PUF) پوشیده شده بود تا از تلفات گرما از اطراف و پایین دستگاه جلوگیری شود. پوشش از شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شده است. آب شور برای آزمایشات، از مخزن به سمت صفحات جاذب پلکانی جاری می‌شود.

شماره	دستگاه	محدوده	دقت
۱	تابش سنج	0 – 900 W/m ²	±4 W/m ²
۲	ترموکوپل	0 °C-300 °C	±1 °C
۳	ترموکوپل	0 °C-90 °C	±0.1 °C
۴	R سرعت سنج	0 – 12 m/s	±0.1 m/s
۵	ظرف جمع کننده	0-1000 ml	±9 ml

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- خواص فیزیکی آب:

فرضیه‌های زیر برای تجزیه و تحلیل آب شیرین کن خورشیدی مطابق تحقیقات گذشته در نظر گرفته شده است: [۴۸]

- در خلال مراحل عملکرد آب شیرین کن خورشیدی وضعیت حالت پایدار در نظر گرفته شده است.
- لایه خنک سازی نازک است.
- پوشش شیشه ای نازک است.
- آب شیرین کن خورشیدی در برابر خروج بخار محافظت شده است.
- گرما در دستگاه از دست نمی‌رود.
- ظرفیت های گرمایی پوشش، مواد جذب و عایق ناچیز است.

۳-۲- ضریب انتقال گرما داخلی:

آزمایشات برای چند روز در طول ماه تیر و مرداد انجام شد. جریان گرما تابعی از اختلاف دما بین آب و شیشه و شار حرارتی بین آب و سطح داخلی شیشه به صورت زیر است:

$$q_{e,w-g} = h_{c,w-g}(T_w - T_{gi}) \quad (1)$$

این ضریب با عدد ناسلت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Nu = h_{c,w-g} \frac{L_c}{K_a} = C(GrPr)^n \quad (2)$$

عدد های گراشوف و پرانتل به صورت زیر نمایش داده می شوند [۴۹]:

$$Gr = \frac{\beta g L_c^3 \rho^2 \Delta T}{\mu^2} \quad \text{و} \quad Pr = \frac{\mu C_{pw}}{k} \quad (3)$$

که:

$$\Delta T = (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w + 273.15)}{(268.9 \times 10^3 - P_w)}$$

متغیرهای سمت راست شامل خواص فیزیکی وابسته به دما هستند و همانطور که قبلا ذکر شد، به دست آمده اند .

معادله (۲) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$h_{c,w-g} = \frac{K_a}{L_c} C(Ra)^n \quad (5)$$

که $Ra = Gr.Pr$ عدد رایلی می‌باشد.

با فرض بر اینکه بخار آب گاز ایده‌آل باشد، عبارت زیر برای خروجی گرمای جریان در نظر گرفته شده است [۵۰]:

$$q''_{e,w-g} = h_{c,w-g}(T_w - T_{gi}) \quad (6)$$

در اینجا $h_{e,w-g}$ به صورت زیر محاسبه می شود:

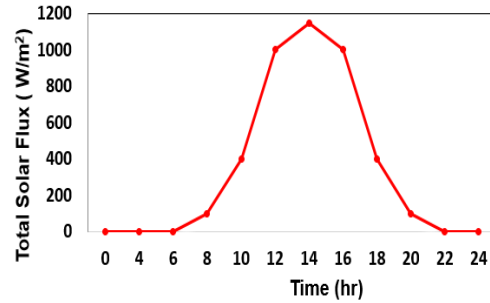
$$h_{e,w-g} = 0.01623 h_{c,w-g} \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} \quad (7)$$

با جایگذاری در معادله ۶ می‌توان گفت :

$$q''_{e,w-g} = 0.01623 \times h_{c,w-g} \times (P_w - P_{gi}) \quad (8)$$

$$q''_{e,w-g} = 0.01623 \times \frac{K_a}{L_c} \times (P_w - P_{gi}) \times C(Ra)^n \quad (9)$$

با استفاده از مقادیر $C = 0.75$ و $n = 1/3$ بیان زیر می‌تواند برای $h_{e,w-g}$ [۵۱] بیان کرد:



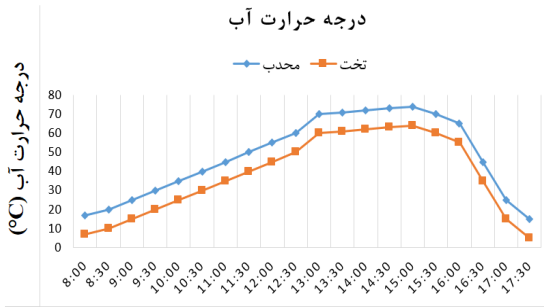
شکل ۳- تغییر کل شار خورشیدی در یک سطح افقی برای روزهای معمول تابستانی (تیر) [۴۳].

مناسب ترین جهت برای نصب جمع کننده خورشیدی که به صورت ثابت مستقر هستند، جهت جغرافیایی شرق-غرب است [۴۷]. در نیمکره شمالی، جمع کننده های خورشیدی باید به سوی جنوب نصب شود تا بتواند از بیشترین انرژی خورشیدی استفاده کند. این آزمایش در طول ماه های تیر و مرداد ماه و آب و هوا روشن و بیشتر روزهای آفتابی انجام شد. سه ترموکوپل مختلف برای اندازه‌گیری دمای صفحه جذب (T_b)، دمای سطح داخلی شیشه (T_{gi}) و دما آب (T_w) استفاده شد. برای نظارت بر دمای سطح تبخیر و دمای سطح چگالش، مجموعه‌ای از ترموکوپل های K-type استفاده شد که به یک سیستم ثبت داده قابل حمل و سیستم نمایشگر متصل شدند. خطا در اندازه‌گیری دما با توجه به سیستم نظارت بر دما، برابر با $\pm 1K$ می باشد. یک مخزن جمع‌آوری برای اندازه گیری میزان تقطیر مورد استفاده قرار گرفت. پس از آماده سازی واحد و لوازم جانبی آن، آب شور با غلظت ثابت نمک اجازه عبور از واحد را پیدا نمود. خروجی‌های عملگر ساعت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از جمع‌آوری داده‌های کافی برای هندسه ورق مسطح، شکل سطح جاذب به سطح محدب تغییر یافت و آزمایش‌ها تکرار شد.

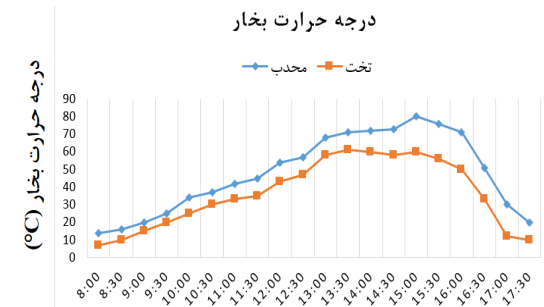
۲-۱-عدم قطعیت

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یکی از عوامل مهم در تحقیقات تجربی است که باید برای هر پارامتر مورد مطالعه محاسبه شود. عدم قطعیت به طور عمده مربوط به اشتباهات ابزار دقیق، اشتباهات جمع‌آوری داده‌ها است.

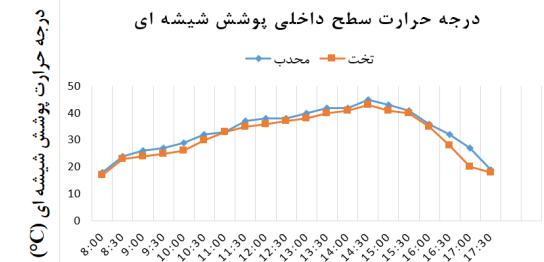
با کمک تابش سنج، شدت تابش خورشید، همچنین سرعت باد، آب تقطیر شده و دما در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است که ابزار و خطاهای موجود در ابزار اندازه‌گیری، محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییر دما آب با زمان (hr)



شکل ۶- تغییر دما بخار با زمان (hr)



شکل ۷- تغییر دمای داخلی پوشش شیشه ای با زمان (hr)

برای دمای داخلی پوشش شیشه و دمای بخار، روند متفاوت است. مقادیر دما برای سطوح جاذب مسطح و محدب بسیار نزدیک است. دمای بخار تقریباً برای هر دو طرح سطح جاذب از ۹:۳۰ صبح تا ۲:۳۰ بعد از ظهر یکسان است. پس از آن، سطح جاذب محدب دارای دمای بخار بالاتر است. در هر دو مورد، اوج دمای بخار در ساعت ۳:۳۰ بعد از ظهر بوجود می‌آید. برای دمای داخلی پوشش شیشه‌ای، حداکثر و حداقل تغییرات دما، به ترتیب در ۵ بعد از ظهر و ۵:۳۰ صبح اتفاق می‌افتد. با این حال، ساعت ۷-۸ صبح زمان حداقل دمای داخلی برای پوشش شیشه‌ای است. مقدار تقطیر عامل اصلی در تعیین عملکرد یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی است. حجم آب موجود در هر مرحله از دستگاه‌ها به علت تفاوت هندسه سطح صفحه جاذب متفاوت است. شکل ۸ تولید آب مقطر در هر کیلوگرم بر متر مربع در ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به حجم کم آب روی سطح در حالت محدب در مقایسه با حالت مسطح، ظرفیت گرمایی پایین‌تر است. بنابراین، تبخیر

$$h_{c,w-g} = 0.884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273.15)}{(268.9 \times 10^3 - P_w)} \right]^{1/3} \quad (10)$$

انتقال گرما از آب به پوشش شیشه‌ای آب شیرین کن خورشیدی نیز به سه صورت انجام می‌شود: یعنی با تبخیر $(h_{e,w-g})$ ، جابجایی $(h_{c,w-g})$ و تابش $(h_{r,w-g})$ که $h_{r,w-g}$ از معادله زیر بدست می‌آید:

$$h_{r,w-g} = \epsilon_{eff} [(T_w^2 + T_g^2) + (T_w + T_s)] \quad (11)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_w} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \quad (12)$$

که مقدار ϵ_{eff} را میتوان ۰/۹ در نظر گرفت [۵۲،۱۵] با استفاده از معادلات (۷) و (۱۰) و (۱۱) و در اختیار داشتن مقادیر مربوط به T_w و T_{gi} ضرایب انتقال گرمای مربوط به تبخیر $(h_{e,w-g})$ ، جابجایی $(h_{c,w-g})$ و تابش $(h_{r,w-g})$ را می‌توان بدست آورد. ضریب انتقال گرمای کلی (h_i) مربوط به آب شیرین کن از مجموع سه ضریب انتقال گرما مربوطه بدست می‌آید:

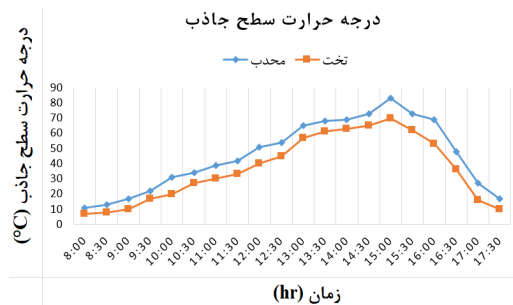
$$h_i = h_{e,w-g} + h_{c,w-g} + h_{r,w-g} \quad (13)$$

بازده آب شیرین کن خورشیدی نسبت انرژی حرارتی مورد استفاده برای تقطیر آب به کل انرژی وارد شده به آب شیرین کن خورشیدی در همان دوره بیان می‌شود. خروجی برای سیستم‌های مختلف نمک زدایی خورشیدی می‌تواند با استفاده از معادله زیر محاسبه شود:

$$\eta = \frac{\sum \dot{m}_{e,w-g} h_{fg}}{\sum I(t) A_b + \dot{m}_{e,w-g} C_{pw} (T_w - T_a)} \times 100 \quad (14)$$

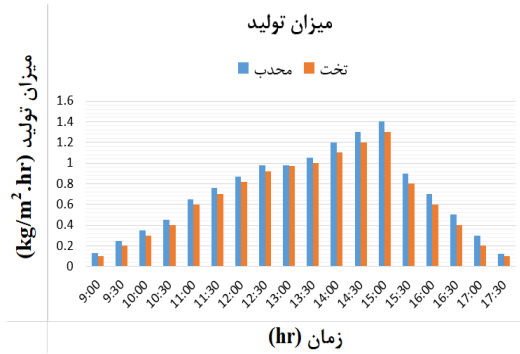
۴- بررسی نتایج

دمای صفحه جاذب (T_b) و دمای مکان‌های مختلف در واحد نمک زدایی در هر دو مجموعه آزمایش‌ها ثبت و گزارش شده است. در شکل-های ۴ تا ۷ تغییر دما در زمان‌های مختلف در روز برای آب شیرین کن خورشیدی مسطح و محدب دیده می‌شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، دما برای T_w و T_{gi} برای حوضچه‌های محدب آب شیرین کن خورشیدی در مقایسه با حوضچه مسطح آب شیرین کن خورشیدی بیشتر است. برای دمای سطح صفحه جاذب (شکل ۴)، سطح جاذب محدب آب شیرین کن خورشیدی، در مقایسه با مقطع مسطح همواره دارای دمای بالاتر است اما تغییرات دما آب متفاوت است. در سطح جاذب مسطح در مقایسه با محدب، صبح (۸-۹ صبح) دما بالاتر است اما شیب آن آهسته‌تر افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که برای همه موارد مورد مطالعه، ساعت ۳ بعد از ظهر اوج زمان برای دما است. تغییرات دما برای سطح جاذب تخت و محدب در داخل دستگاه مطابق شکل ۷ صورت می‌گیرد.



شکل ۸- تغییر دما سطح صفحات جاذب با زمان (hr)

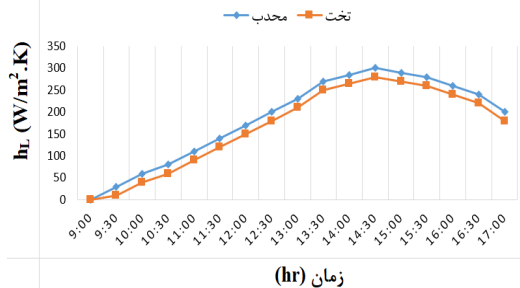
سطحی آب بر روی سطح جاذب محدب سریع‌تر رخ می‌دهد و در نتیجه میزان تولید آب شیرین در مقایسه با سطح جاذب مسطح افزایش می‌یابد.



شکل ۸- آب مقطر تولید شده

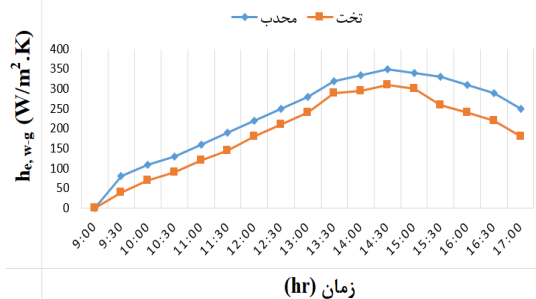
شکل ۹ خلاصه‌ای از تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی کل (h_i) را از آب به شیشه (شکل ۹-الف) و ضریب انتقال گرما تبخیر (h_{e,w-g}) (شکل ۹-ب) برای سطح جاذب مسطح و محدب نمایش می‌دهد. برای هر دو نمودار مقادیر در ساعت ۹ صبح نزدیک به صفر هستند و در طول زمان تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کنند. مقدار حداکثر آنها در ساعت ۲:۳۰ بعد از ظهر اتفاق می‌افتد و بعد از آن مقادیر تقریباً خطی با شیب قبلی کاهش می‌یابد، اما در جهت منفی. علاوه بر این از نمودارها می‌توان دریافت که مقادیر h_i و h_{e,w-g} برای سطح جاذب محدب، در مقایسه با سطح جاذب مسطح، بیشتر می‌باشد.

ضریب انتقال حرارت داخلی کلی



الف) ضریب انتقال گرمای داخلی کل

ضریب انتقال حرارت تبخیر



ب) ضریب انتقال گرمای تبخیر

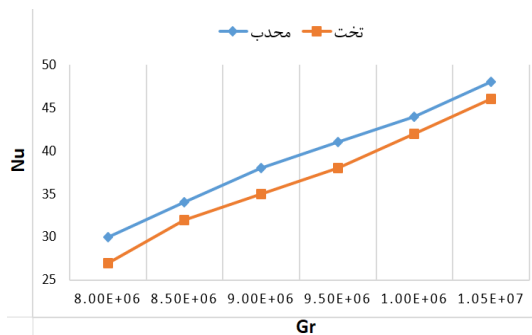
شکل ۹- تغییرات ساعتی h_i و h_{e,w-g} برای حوضچه های صاف و محدب

داده‌ها در روزهای مختلف برای تجزیه و تحلیل اثر شدت تابش خورشید بر بهره‌وری در مقادیر متفاوت دمای شیشه و آب و سرعت باد مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه به دست آمده این است که مناسب-ترین زمان برای انجام آزمایش‌ها از خرداد ماه تا شهریور ماه است. همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، بهره‌وری با افزایش شدت تابش خورشید افزایش می‌یابد. متوسط دمای خورشید، ورودی انرژی و سرعت باد در طول آزمایش ۳۳ درجه سلسیوس، ۸۰۰ وات بر متر مکعب و ۱/۲ متر بر ثانیه بوده است.

جدول ۴- تاثیر شدت خورشید بر تولید آب

زمان (h)	شدت تابش خورشید	دمای شیشه (°C)	دمای آب (°C)
۹	۳۰	۳۳	۳۷
۱۰	۳۶	۴۴	۵۰
۱۱	۴۳	۵۵	۶۲
۱۲	۵۰	۶۵	۷۳
۱۳	۵۶	۷۵	۸۲
۱۴	۶۰	۸۰	۸۷
۱۵	۵۸	۷۸	۸۵
۱۶	۵۰	۷۰	۷۵
۱۷	۳۵	۶۰	۶۲

در نهایت تلاش برای یافتن ارتباطات بر روی بیش از ۶۰۰ داده آزمایشی در دسترس صورت گرفت. پارامترهای عدد ناسلت (Nu) و عدد پرانتل (Pr)، عدد گراشوف (Gr) و زاویه شیب (θ) آب شیرین کن خورشیدی دارای همبستگی می‌باشند. برای محاسبه متغیرهای ثابت، مجموعه داده‌ها در اکسل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش یکنواخت در خطوط مستقیم که در شکل ۱۰ نشان داده شده است منحنی‌های کاربردی هستند و برای اهداف طراحی دارای مزیت می‌باشند.



شکل ۱۰- نمودار داده های تجربی برای فرمول پیشنهادی عدد ناسلت با $\theta = 32.5^\circ$

فرمول تجربی بین عدد Nu و Gr, Pr و θ در معادلات (۱۵) و (۱۶) برای یک آب شیرین کن خورشیدی با هر دو سطح مسطح یا محدب با زوایای مختلف به ارائه شده است:

w	عرض (m)
علائم یونانی	
θ	زاویه انحراف آب شیرین کن (°)
ϵ_{eff}	تابش موثر
σ	ثابت استفان بولتزمن ($W/m^2 K^4$)
μ	لزجت دینامیکی ($kg/m s$)
η	بازده آب شیرین کن خورشیدی (%)
زیرنویس ها و پسوندها	
a	محیط
b	صفحه جاذب
c	همرفت
e	تبخیر
w-g	از سطح آب به شیشه
g	شیشه
i	داخلی
gi	سطح داخلی شیشه
ins	عایق
l	مایع
p	صفحه
r	تابش
s	آسمان
w	آب
eff	موثر

۷- مراجع

- [۱] گچکاران آ. و جدا ف. طراحی و بهینه‌سازی آب‌شیرین کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص. ۲۳۵-۲۴۴، ۱۳۹۸.
- [۲] خسروچردی س.، میر عبدالله لواسانی آ. و دلفانی ش. تحلیل تجربی تاثیر صفحات گرافن اکساید/آب دیونیزه بر عملکرد یک گردآورنده جذب مستقیم خورشیدی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص. ۱۶۹-۱۷۷، ۱۳۹۷.
- [۳] خوش آهنگ ع.، رهبر ن.، تاثیر لایه متخلخل بر راندمان آب شیرین کن خورشیدی شیب دار یک طرفه، بررسی تجربی. *مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات*، د. ۹، ش. ۱، ص. ۴۴-۳۶، ۱۳۹۷.
- [۴] علی پناه ف.، رهبر ن.، بررسی عددی تاثیر ابعاد پله بر عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی پلکانی. *مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات*، د. ۶، ش. ۱، ص. ۲۱۸-۲۱۴، ۱۳۹۷.
- [5] Sadripour S., 3D numerical analysis of atmospheric-aerosol/carbon-black nanofluid flow within a solar air heater located in Shiraz, Iran. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2018.
- [6] Dsilva Winfred Rufuss D., Iniyas S., Suganthi L. and Davies P.A., Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, pp. 464-496, 2016.
- [7] Mahian O., Kianifar A., Heris S.Z., Wen D., Sahin A.Z. and Wongwises S., Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger. *Nano Energy*, Vol. 36, pp. 134-155, 2017.

$$Nu = 0.34 Pr^{0.34} Gr^{0.36} \exp(\theta^{0.5}) \quad (15)$$

$$Nu = 0.38 Pr^{0.34} Gr^{0.36} \exp(\theta^{0.5}) \quad (16)$$

دمای متوسط چگالنده و تبخیرکننده برای تعریف ویژگی‌های ترموفیزیکی سیستم انتقال گرما استفاده می‌شود. عدد گراشوف برای مطالعه‌ی آب شیرین‌کن خورشیدی جهت یافتن زاویه‌ی انحراف مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. اثر انتقال گرما به صورت رسانش مربوط به یک مایع تک فاز با استفاده از عدد پراتل بررسی می‌گردد. به عنوان مثال شکل ۱۰ نمودارهای داده‌ها را برای زاویه پیشنهاد شده $\theta = 32.5^\circ$ درجه نشان می‌دهد.

۵- نتیجه گیری

یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی انتقال گرما و اثربخشی فرآیند شیرین سازی آب برای دو هندسه سطح جاذب (تخت و محدب) برای آب شیرین کن خورشیدی پله‌ای و زوایای شیب مختلف صورت گرفته شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که انتقال گرما با زوایای انحراف متفاوت آب شیرین کن خورشیدی تغییر می‌کند و حداکثر انتقال گرما در آب شیرین کن خورشیدی محدب اتفاق می‌افتد و دلیل این امر آن است که سطوح محدب دارای مساحت بیشتری نسبت به سطوح تخت می‌باشند. زاویه شیب پوشش تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی دارد. از نتایج آزمایش می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین زاویه شیب برای آب شیرین کن خورشیدی ۳۲.۵ درجه نسبت به محور افقی است. علت این امر آن است که در این زاویه بهینه ضریب انتقال گرما بدست می‌آید لذا زوایای کمتر یا بیشتر از این مقدار باعث کاهش ضریب انتقال گرما می‌شوند. در نهایت، دو فرمول تجربی بر اساس عدد پراتل (Pr)، عدد گراشوف (Gr)، زاویه شیب آب شیرین کن خورشیدی (θ) برای محاسبه عدد ناسلت به دست آمد. همچنین می‌توان گفت که این دستگاه در حدود مصرف یک خانوار ۳ الی ۴ نفره آب تولید می‌کند و در طولانی مدت توجیه اقتصادی دارد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

$\dot{m}_{e,w}$	مقدار آب تقطیر شده (kg/m^2 per day)
L_c	طول اصلاح شده (m)
q''_g	شار گرمای تبخیر (W/m^2)
C_{pw}	ظرفیت گرمایی آب ($J/kg K$)
Gr	عدد گراشوف
h	ضریب انتقال گرما ($W/m^2 K$)
U	ضریب افت گرما ($W/m^2 K$)
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر (kJ / kg)
L	طول (m)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار جزئی (N/m^2)
Pr	عدد پراتل
k_a	رسانندگی گرمایی هوا ($W / m K$)
I	شدت تابش خورشیدی (W/m^2)
T	دما (K)

- [27] Morad M.M., El-Maghawry H.A.M. and Wasfy K.I., Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover. *Desalination*, Vol. 373, pp. 1-9, 2015.
- [28] Panchal H., Performance investigation on variations of glass cover thickness on solar still: experimental and theoretical analysis. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, Vol. 1(1), pp. 1-7, 2016.
- [29] Sathyamurthy R., Kennady H.J., Nagarajan P.K. and Ahsan A., Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still. *Desalination*, Vol. 344, pp. 383-390, 2014.
- [30] El-Agouz S.A., El-Samadony Y.A.F. and Kabeel A.E., Performance evaluation of a continuous flow inclined solar still desalination system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 606-615, 2015.
- [31] Walid H., Soifiane K., Yacine H. and Arif M., Nanopyranid-based absorber to boost the efficiency of InGaN solar cells. *Solar Energy*, Vol. 190, pp. 93-103, 2019.
- [32] Mohamed A.F., Hegazi A.A., Sultan G.I. and Emad M.S., Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber: Experimental study and thermo-economic analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 200, pp. 109-119, 2019.
- [33] Elango T. and Murugavel K.K., The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination*, Vol. 359, pp. 82-91, 2015.
- [34] Harris Samuel D., Nagarajan P., Arunkumar T., Kannan E. and Sathyamurthy R., Enhancing the solar still yield by increasing the surface area of water—A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 35(3), pp. 815-822, 2016.
- [35] 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.
- [36] Hansen R.S., Narayanan C.S. and Murugavel K.K., Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh. *Desalination*, Vol. 358, pp. 1-8, 2015.
- [37] Panchal H.N. and Patel S., An extensive review on different design and climatic parameters to increase distillate output of solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 750-758, 2017.
- [38] Dimri V., Sarkar B., Singh U. and Tiwari G., Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation. *Desalination*, Vol. 227(1-3), pp. 178-189, 2008.
- [39] Sharshir S.W., Yang N., Peng G. and Kabeel A.E., Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, pp. 267-284, 2016.
- [40] Bait O. and Si-Ameur M., Enhanced heat and mass transfer in solar stills using nanofluids: A review. *Solar Energy*, Vol. 170, pp. 694-722, 2018.
- [41] Verma S.K., Tiwari A.K., Tiwari S. and Chauhan D.S., Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid. *Solar Energy*, Vol. 167, pp. 231-241, 2018.
- [42] Kabeel A.E. and Abdelgaied M., Enhancement of pyramid-shaped solar stills performance using a high thermal conductivity absorber plate and cooling the glass cover. *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 769-775, 2019.
- [43] Khalifa A.J.N., On the effect of cover tilt angle of the simple solar still on its productivity in different seasons and latitudes. *Energy conversion and management*, Vol. 52(1), pp. 431-436, 2011.
- [44] Sivakumar V. and Ganapathy Sundaram E., Improvement techniques of solar still efficiency: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 246-264, 2013.
- [45] Ulgen K., Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 28(13), pp. 1171-1180, 2006.
- [8] Zanganeh P., Goharrizi A.S., Ayatollahi S. and Feilzadeh M., Productivity enhancement of solar stills by nano-coating of condensing surface. *Desalination*, Vol. 454, pp. 1-9, 2019.
- [9] Menni Y., Azzi A. and Chamkha A., Modeling and analysis of solar air channels with attachments of different shapes. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2018.
- [10] Kabeel A.E., Omara Z.M., Essa F.A. and Abdullah A., Solar still with condenser-A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59(C), pp.839-857, 2013.
- [11] Arunkumar T., Raj K., Dsilva Winfred Rufuss D., Denkenberger D., Tingting G., Xuan L. and Velraj R., A review of efficient high productivity solar stills. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101, pp. 197-220, 2019.
- [12] Ahsan, Imteaz M., Thomas U.A., Azmi M., Rahman A. and Nik Daud N.N., Parameters affecting the performance of a low cost solar still. *Applied Energy*, Vol. 114, pp. 924-930, 2014.
- [13] El-Sebaei and El-Bialy E., Advanced designs of solar desalination systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp.1198-1212, 2015.
- [14] Yang Y., Zhao R., Zhang T., Zhao K., Xiao P., Ma Y., Ajayan P.M., Shi G. and Chen Y., Graphene-Based Standalone Solar Energy Converter for Water Desalination and Purification. *ACS nano*, 2018.
- [15] Omara Z.M., Kabeel A.E. and Essa F.A., Effect of using nanofluids and providing vacuum on the yield of corrugated wick solar still. *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 965-972, 2015.
- [16] Abujazar M.S.S., Fatihah S., Rakmi A. and Shahrom M., The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination*, Vol. 385, pp.178-193, 2016.
- [17] Singh D.B., Yadav J.K., Dwivedi V.K., Kumar S., Tiwari G.N. and Al-Helal I.M., Experimental studies of active solar still integrated with two hybrid PVT collectors. *Solar Energy*, Vol. 130, pp. 207-223, 2016.
- [18] Chen Z., Peng J., Chen G., Hou L., Yu T., Yao Y. and Zheng H., Analysis of heat and mass transferring mechanism of multi-stage stacked-tray solar seawater desalination still and experimental research on its performance. *Solar Energy*, Vol. 142, pp. 278-287, 2017.
- [19] Kabeel A.E. and Abdelgaied M., Observational study of modified solar still coupled with oil serpentine loop from cylindrical parabolic concentrator and phase changing material under basin. *Solar Energy*, Vol. 144, pp. 71-78, 2017.
- [20] Ibrahim A.G.M. and Elshamarka S.E., Performance study of a modified basin type solar still. *Solar Energy*, Vol. 118, pp. 397-409, 2015.
- [21] Rahbar N., Esfahani J.A. and Fotouhi-Bafghi E., Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still – CFD simulation and theoretical analysis. *Solar Energy*, Vol. 113, pp. 313-323, 2015.
- [22] Dehghan A.A., Afshari A., Rahbar N., Thermal modeling and exergetic analysis of a thermoelectric assisted solar still. *Solar Energy*, Vol. 115, pp. 277-288, 2015.
- [23] Sathyamurthy R., El-Agouz S.A. and Dharmaraj V., Experimental analysis of a portable solar still with evaporation and condensation chambers. *Desalination*, Vol. 367, pp. 180-185, 2015.
- [24] Harris Samuel D.G., Nagarajan P.K., Sathyamurthy R., El-Agouz S.A. and Kannan E., Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material. *Energy Conversion and Management*, Vol. 112, pp. 125-134, 2016.
- [25] Kabeel A.E. and Abdelgaied M., Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions. *Desalination*, Vol. 383, pp. 22-28, 2016.
- [26] Alaian W.M., Elnegiry E.A. and Hamed A.M., Experimental investigation on the performance of solar still augmented with pin-finned wick. *Desalination*, Vol. 379, pp. 10-15, 2016.

- [46] Olcan, Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems. *Energy conversion and management*, Vol. 100, pp. 358-369, 2015.
- [47] Mohammadi K. and Khorasanizadeh H., A review of solar radiation on vertically mounted solar surfaces and proper azimuth angles in six Iranian major cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, pp. 504-518, 2015.
- [48] Llorens, Which direction should solar panels face?, in: <https://solarpowerrocks.com/solar-basics/which-direction-should-solar-panels-face/> (Ed.), 2018.
- [49] Kaushal and Varun., Solar stills: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14(1), pp. 446-453, 2010.
- [50] Tiwari A.K. and Tiwari G., Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination*, Vol. 195(1-3), pp. 78-94, 2006.
- [51] Gawande J.S. and Bhuyar L.B., Effect of shape of the absorber surface on the performance of stepped type solar still. *Energy and Power Engineering*, Vol. 5(08), pp. 489-497, 2013.
- [52] Mousa H. and Gujarathi A.M., Modeling and analysis the productivity of solar desalination units with phase change materials. *Renewable Energy*, Vol. 95, pp. 225-232, 2016.