

بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی و منبع ذخیره انرژی گرمایی

حمید رضا گشایشی*

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

سید سینا ادیبی طوسی

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

چکیده

امروزه آب شیرین کن های خورشیدی به طور گسترده ای به منظور شیرین سازی آب مورد استفاده قرار گرفته اند. در این تحقیق از یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی که دارای ۷ پله به ارتفاع ۳۵ میلی متر، عرض ۸۰ میلی متر و طول ۶۰۰ میلی متر می باشد، استفاده شده است. به منظور ادامه شیرین سازی آب بعد از غروب خورشید، از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان منبع ذخیره انرژی گرمایی بهره گرفته تا در زمانی که خورشید غروب می کند همچنان بتوان به شیرین سازی آب ادامه داد. در این مطالعه از ماده تغییر فاز دهنده اسید استئاریک استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش بازده دستگاه، از یک فن به منظور مکش هوای داخل آب شیرین کن و یک چگالنده استفاده شده است. آزمایش در چهار حالت انجام پذیرفته است حالت اول در حالت ساده، حالت دوم فقط با استفاده از فن مکند و چگالنده، حالت سوم همراه با استئاریک اسید و حالت چهارم همزمان از ماده تغییر فاز دهنده و چگالنده استفاده شده است که نسبت به حالت ساده ۱۰۴ درصد افزایش تولید داشته است.

واژه های کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، ماده تغییر فاز دهنده، چگالنده خارجی، فن مکند، انرژی تجدید پذیر.

Experimental investigation of stepped solar still with external condenser and heat energy storage

Hamid reza Goshayeshi
Seyd Sina Adibi Toosi

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

Abstract

Nowadays solar still is widely used in solar desalination processes. This work presents a modified stepped solar still with 7 steps 35 mm high, 80 mm wide and 600 mm long and external condenser. Phase Change Material is used as a heat storage source to continue to sweeten saline water after sunset. In this study, stearic acid has been used as phase change material. In order to increase the efficiency of the still, a fan has been used to suck the air in the stepped solar still and transfer it to the condenser. The experiment was carried out in four modes: the first mode was simple, the second mode was only with the fan and the condenser, the third mode, with stearic acid as phase change material, and the fourth mode was used simultaneously with the PCM and external condenser. The results show that the maximum productivity was obtained in fourth mode of experiment which is increased 104%.

Keywords: Stepped solar still, Phase change material, External condenser, Suction fan, Renewable energy.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و بالا رفتن استانداردهای زندگی در بسیاری از کشورها موجب نیاز روز افزون به آبهای زیرزمینی برای مصارف مختلف کشاورزی، صنعتی و خانگی شده است [۱]. خوشبختانه ایران در منطقه جغرافیایی مناسبی از منظر دریافت انرژی خورشیدی قرار گرفته و یکی از مستعد ترین کشورها جهت بهره گیری از انرژی خورشیدی است. انرژی خورشیدی سالیانه دریافتی ایران حدود سه هزار برابر مصرف سالیانه انرژی کشور می باشد و اگر بتوان از این انرژی با بازده ۱۰ درصد بهره گرفت، با استفاده از حدود ۳ درصد سطح کشور می توان کل انرژی مورد نیاز را تامین نمود [۲]. از انرژی خورشیدی برای مصارف گوناگونی می توان بهره برد که به برخی از آنها اشاره می شود: تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه های خورشیدی، گرمایش فضای داخلی ساختمان ها، سرمایش فضای داخلی ساختمان ها و یخچال های خورشیدی، گرمایش آب مصرفی بوسیله گرمکن های خورشیدی، خوراک پز های خورشیدی، خشک کن های خورشیدی به منظور خشک کردن محصولات کشاورزی، آب شیرین کن های خورشیدی در اندازه های خانگی و صنعتی [۳].

مهم ترین آثار گرمایش زمین عبارتند از آب شدن صخره های یخی، تغییر چرخه آب در کره زمین و طوفان های شدید که زندگی تمام موجودات زنده اعم از گیاهان، جانوران و انسان ها را در مخاطره قرار داده است. برای جلوگیری از مشکلات مذکور تصمیم بر کاهش میزان گازهای گلخانه ای گرفته شده است. از طرفی منابع سوخت های فسیلی رو به اتمام هستند و انسان ناگزیر از یافتن منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، آب، باد و حتی انرژی گرمایی زمین است. به طور کلی باید به نحوی انرژی های نامبرده را مهار، ذخیره و مورد استفاده قرار داد که در این بین ذخیره سازی انرژی گرمایی اهمیت ویژه ای دارد [۴].

PCMs^۱ ها یا مواد تغییر فاز دهنده به عنوان مواد ذخیره کننده ی انرژی شناخته می شوند. به طور کلی مواد می توانند به سه شکل انرژی را در خود ذخیره کنند؛ انرژی شیمیایی، انرژی نهان و انرژی محسوس. PCM ها در دسته ی دوم قرار می گیرند [۵]. یکی از روش های ذخیره انرژی بر مبنای گرمای نهان از روش های ذخیره انرژی

^۱ Phase Change Materials

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

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۹

گرمایی، ذخیره گرمای نهان است که می‌تواند بر پایه ماده تغییر فاز دهنده (PCM) باشد. بنابراین بیشتر مواد تغییر فاز دهنده (PCMs) موادی هستند که طی فرایند تغییر حالت از جامد به مایع، انرژی را ذخیره می‌کنند. این مواد در واقع گرمای نهان را ذخیره می‌کنند و از پیوندهای شیمیایی برای ذخیره و آزادسازی انرژی گرمایی استفاده می‌کنند. PCM ها با توجه به دمای تغییر حالتشان کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. موادی که زیر 15°C ذوب می‌شوند، برای خنک کردن و تهویه هوای اتاق قابلیت استفاده دارند [۶]. مواد تغییر فاز دهنده را می‌توان به دو دسته آلی و غیر آلی تقسیم نمود.

PCM های آلی را می‌توان به گروه پارافین ها (ذخیره الکانه) و غیر پارافین ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل ها و گلیکولیک اسیدها تقسیم بندی نمود. دی هیدرات سولفات سدیم، هگزهیدرات کلراید کلسیم و پارافین جز مهمترین PCM ها هستند. PCM ها را بر اساس دمای تغییر فاز، به سه دسته مهم می‌توان تقسیم نمود که عبارتند از: پوتکتیک، هیدرات نمک ها و مواد آلی، یوتکتیک هانمک های محلول در آب هستند که دمای تغییر فاز آنها کمتر از 0°C است و هیدرات نمکها، نمک های خاصی هستند که دمای تغییر فاز آنها بالای 0°C است. مواد آلی نیز معمولاً از زنجیره های بلند کربن و هیدروژن تشکیل شده‌اند که دمای تغییر فاز آنها نیز بالای 0°C است. برای کاربردهای تجاری و صنعتی، مواد تغییر فاز دهنده باید داخل یک پوشش آب بندی شده قرار گیرند، دمای کاری متداول ترین PCM ها بین -40 تا $+117$ درجه سلسیوس است. این مواد را می‌توان زیر به صورت صفحه، لوله و یا گرد، با پوششی از جنس پلی اتیلن بسته بندی نمود [۷].

PCM های غیر آلی عموماً به دو دسته ی نمک های هیدراته و فلزات تقسیم بندی می‌شوند. این PCM ها اکثراً نسبت به PCM های آلی چگال ترند و از ظرفیت ذخیره سازی انرژی بیشتری برخوردارند. از نظر قیمت نیز عموماً از PCM های آلی ارزان تر هستند. در کنار مزایای ذکر شده PCM های غیر آلی عموماً خورنده اند و در مورد اکثر آنها باید از افزودنی های خاصی استفاده کرد، عموماً مشکل فوق سرد شدن دارند به عبارتی این مواد در هنگام رسیدن به دمای انجماد به سختی کریستاله می‌شوند [۸].

در یک مدل ریاضی گچکاران و همکاران [۹] به شبیه‌سازی یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای همراه با PCM در زیر آن با استفاده از مدل ژنتیک پرداختند. آنها از واکس پارافین به عنوان PCM استفاده کردند و نتیجه گرفتند هرچه PCM رسانایی گرمایی بالاتری داشته‌باشد، میزان تولید آب بیشتر خواهد بود و تولید آب شیرین کن را با استفاده از این روش بهبود بخشیدند.

خسروجردی و همکاران [۱۰] نیز استفاده از نانوسیال اکسید گرافن در گردآورهای خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند که دریافتند با استفاده از این نانوسیال بر پایه آب دیونیزه راندمان گردآور $75/07$ درصد خواهد بود در حالی که راندمان دستگاه برای سیال پایه تنها $58/25$ بوده‌است.

سومانچی و همکاران [۱۱] از یک آب شیرین کن خورشیدی ساده (تک حوضچه ای) کردند. آن ها از سه ماده تغییر فاز دهنده پتاسیم دی کرومات ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)، سدیم سولفات ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) و سدیم استات (CH_3COONa) به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده کردند. آن ها نشان دادند که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عنوان منبع

ذخیره انرژی می‌توان بازده و نرخ تولید آب شیرین کن را افزایش داد و بهبود بخشید. همچنین آن ها نشان دادند که در بین این سه ماده تغییر فاز دهنده سدیم سولفات به دلیل نقطه ذوب بالاتر نسبت به سدیم استات و پتاسیم دی کرومات عملکرد و نرخ تولید بالاتر و بهتری داشته‌است.

نعیم [۱۲] و همکاران از پارافین در یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای استفاده کردند و نرخ تولید دستگاه به 40 ml/min افزایش یافت که در ابتدا این مقدار بدون PCM، 30 ml/min بود. نجمه [۱۳] و همکاران از $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ و KMnO_4 و Violet dye به عنوان PCM استفاده نمودند و به ترتیب شاهد افزایش 17 ، 26 و 29 درصدی نرخ تولید دستگاه بودند. همچنین السبای [۱۴] و همکاران در یک آب شیرین کن تک حوضچه‌ای از پارافین استفاده کردند و تولید آن‌ها به ترتیب با PCM، $9.005 \text{ kg/m}^2/\text{day}$ و بدون PCM، $4.998 \text{ kg/m}^2/\text{day}$ بود. همچنین الهمدانی [۱۵] و همکاران از لاریک اسید در آب شیرین کن تک حوضچه‌ای استفاده کردند و افزایش 127 درصدی نرخ تولید را نتیجه گرفتند. پراساد [۱۶] و همکاران نیز از ژل گرافیت به عنوان PCM در آب شیرین کن معمولی استفاده کردند و بازده دستگاه 13 درصد افزایش یافت. سوتا [۱۷] و همکاران هم از لاریک اسید در کشور هندوستان در یک آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه‌ای استفاده کردند و بازده دستگاه از 13 درصد به 36 درصد رسید. شوبها [۱۸] و همکاران نیز از یک گردآور لوله خلاء به منظور پیش گرمایش آب استفاده کرده و همچنین از KMnO_4 به عنوان PCM استفاده کردند و به ترتیب بازده دستگاه از 39 درصد به 59 درصد افزایش یافت.

در آنالیز آزمایشگاهی دیگری ساراوانان [۱۹] و همکاران از یک آب شیرین کن خورشیدی ساده استفاده کرده‌اند که آزمایشات خود را یکبار با ماده تغییر فاز دهنده و یکبار بدون ماده تغییر فاز دهنده انجام دادند. آن ها از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده کردند و نشان دادند که زمانیکه از ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌شود به دلیل افزایش زمان شیرین سازی آب شور در نبود انرژی خورشیدی و ادامه شیرین سازی آب، راندمان دستگاه افزایش پیدا کرده و نسبت به زمانیکه از ماده تغییر فاز دهنده استفاده نشده، تولید بیشتری خواهیم داشت. همچنین آن ها نشان دادند که بیشترین نرخ تولید در پایین ترین نرخ جریان آب شور به دست می‌آید.

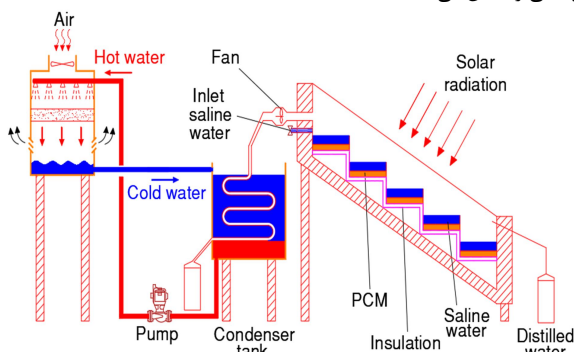
آگراوال [۲۰] در کشور هندوستان از یک آب شیرین کن خورشیدی پلکانی و پارافین که یک ماده تغییر فاز دهنده است به عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده نمود و نشان داد که می‌توان با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در طول شب و زمانیکه ما از نعمت خورشید بی بهره‌ایم به شیرین سازی آب و تولید آب شیرین ادامه داد. همچنین نتیجه گرفت که با استفاده از آب شیرین کن خورشیدی پلکانی نسبت به معمولی 35 تا 40 درصد می‌توان بازده آب شیرین کن را بهبود بخشید.

محمد دشتیان و فرشاد فرشچی تبریزی [۲۱] به مطالعات نظری روی یک آب شیرین کن آبشاری پرداختند. آنها دو آزمایش یکبار همراه با ماده تغییر فاز دهنده و یکبار بدون ماده تغییر فاز دهنده انجام دادند که نرخ تولید به ترتیب 6.7 و $5.1 \text{ Kg/m}^2/\text{day}$ بدست آمد و در نهایت نتیجه گرفتند که نرخ تولید آب شیرین کن آبشاری همراه با ماده تغییر فاز دهنده 31 درصد بیشتر از حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده است.

دهنده، فن مکنده و چگالنده خارجی در راستای بهبود عملکرد این نوع آب شیرین کن‌های خورشیدی می‌پردازد. در این تحقیق ماده تغییر فاز دهنده استنایک اسید می‌باشد که ماده‌ای جامد و موم مانند است و بی اسید چرب اشباع زنجیره‌ای با ۱۸ کربن می‌باشد که به تازگی در گردآورهای خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- مراحل ساخت

در این بخش مراحل و روش ساخت دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی، چگالنده خارجی و محفظه ماده تغییر فاز دهنده مورد نظر شرح داده می‌شود. همچنین شکل ۱ طرحواره کامل دستگاه مورد آزمایش را نمایش می‌دهد. جدول ۱ نیز مشخصات آب شیرین کن خورشیدی پلکانی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرحواره دستگاه آزمایش

۲-۱- بدنه دستگاه

بدنه دستگاه از ورق گالوانیزه با قطر دو میلی‌متر ساخته شده است، دلیل آن مقاومت نسبی گالوانیزه در مقابل خوردگی و همچنین رسانایی گرمایی آن است. با توجه به شکل خاص دستگاه، جداره‌های دستگاه برش‌های زاویه دار و شکسته دارد لذا برای برش‌های مورد نظر از قیچی ورق بر استفاده شده‌است.

جدول ۱- مشخصات آب شیرین کن پلکانی

شماره	مشخصات	مقدار
۱	تعداد پله	۷
۲	ارتفاع پله‌ها (mm)	۳۵
۳	طول هر پله (mm)	۶۰۰
۴	عرض هر پله (mm)	۸۰
۵	نوع شیشه	سکوریت با ضخامت ۱۰
۶	جنس بدنه	گالوانیزه

۲-۲- پلکان‌ها

پس از ساخت بدنه دستگاه، نوبت به نصب پلکان‌ها می‌رسد. پلکان در دستگاه آب شیرین کن نقش بسیار مهمی دارد چرا که آب با عبور از

کابیل [۲۲] و همکاران به بررسی تاثیر ضخامت لایه سه ماده تغییر فاز دهنده استنایک اسید، کاپریک پالمیتیک و کلسیم کلرید بر روی یک آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه ای پرداختند. آنها آزمایشات خود را با چهار ضخامت مختلف ۲cm، ۳cm، ۴cm و ۵cm انجام دادند و مشاهده کردند که ضخامت لایه ماده تغییر فاز دهنده هیچ تاثیری در نرخ تولید آب شیرین کن نخواهد داشت.

کاظم [۲۳] و همکاران به بررسی تاثیر پیش گرم کردن آب ورودی به آب شیرین کن و همچنین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده روی یک آب شیرین کن خورشیدی پرداختند. آنها از پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده و از یک دیش به منظور متمرکز کردن نور خورشید و یک مبادله‌کن گرمایی استفاده کردند. آنها در چهار حالت آزمایش را انجام دادند: حالت اول بدون استفاده از پارافین و پیش گرمکن، حالت دوم با استفاده از پیش گرمکن و بدون پارافین که نتیجه گرفتند در این حالت تولید آب تا ۱۸۰ درصد افزایش می‌یابد، حالت سوم با استفاده از پارافین و بدون پیش گرمکن که در این حالت نیز با توجه به آزمایشاتی که انجام دادند بازده دستگاه تا ۵۲ درصد افزایش می‌یابد و در نهایت حالت چهارم که دستگاه را با استفاده از پیش گرمکن و پارافین مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده نمودند که تولید دستگاه تا ۳۰۷ درصد افزایش می‌یابد و نسبت به حالت‌های دیگر مورد آزمایش مناسب تر می‌باشد.

راهبی [۲۴] و همکاران روی یک آب شیرین کن معمولی تک حوضچه‌ای که سطح جاذب آن را به صورت پره دار ساخته و از یک چگالنده خارجی ولی بدون فن استفاده کردند همچنین برای تبادل هوا در دستگاه یک راه برای ورود هوا در نظر گرفتند و نشان دادند که نرخ تولید این دستگاه در مقایسه با آب شیرین کن معمولی تک حوضچه ای ساده زمانیکه فقط از سطح جاذب فین دار ۲۳/۳۹ درصد، فقط از چگالنده خارجی ۱۱ درصد و زمانیکه هم از سطح جاذب پره دار و هم از چگالنده خارجی استفاده نماییم تا ۴۱/۹۵ درصد افزایش می‌یابد.

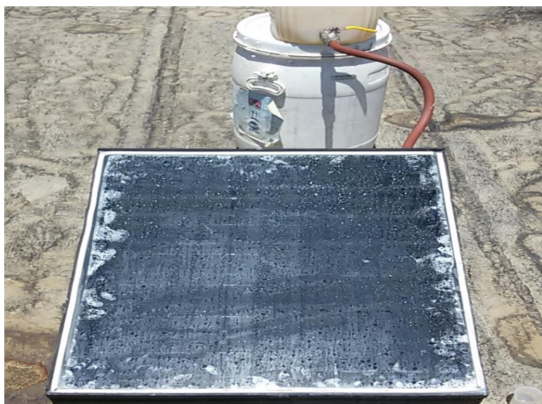
الشراره [۲۵] و همکاران در اردن به بررسی تاثیر ماده تغییر فاز دهنده بر روی یک آب شیرین کن تک حوضچه ای پرداختند و نشان دادند با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در زیر حوضچه آب شیرین کن خورشیدی تک حوضچه ای میزان نرخ تولید دستگاه افزایش می‌یابد.

یکی از انواع آب شیرین کن خورشیدی، آب شیرین کن خورشیدی هرمی است که مزیت آن این است که با زوایای افق کم نیز می‌تواند جذب تابش مناسبی داشته باشد. از این رو، کابییل [۲۶] و همکاران به بررسی آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی هرمی همراه با صفحه جاذب V شکل و ماده تغییر فاز دهنده در زیر سطح جاذب پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده کردند استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و سطح جاذب V شکل تا ۸۷ درصد باعث بهبود عملکرد آب شیرین خورشیدی هرمی ساده می‌شود.

همان‌گونه که اشاره شد فعالیت‌های فراوانی در زمینه آب شیرین کن‌های خورشیدی انجام پذیرفته‌است اما چه در داخل و چه در خارج کشور به طور همزمان از ماده تغییر فاز دهنده، فن مکنده و چگالنده خارجی روی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی تحقیقی انجام نشده‌است لذا در این تحقیق، محقق به مطالعه‌ای آب شیرین کن خورشیدی پلکانی و بررسی تاثیر استفاده همزمان از ماده تغییر فاز

۴-۲- سر شیرهای خروجی آب از دستگاه

برای جمع آوری آب شیرین و شور خروجی از دستگاه سرشیرهایی در انتهای دستگاه و در زیر آخرین پلکان نصب شده است تا آب خروجی از آن خارج شده و توسط شیلنگ یا لوله به ظرف مخصوص منتقل شده است. (شکل ۴).



شکل ۲- آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده حین آزمایش

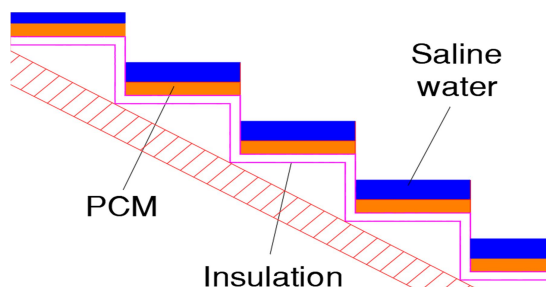
۵-۲- محفظه های مواد تغییر فاز دهنده

به منظور ذخیره سازی انرژی خورشیدی و استفاده از آن در زمانی که از این نعمت بی بهره ایم، از مواد تغییر فاز دهنده در زیر دستگاه استفاده می کنیم. به این منظور زیر هر پله از پلکان آب شیرین کن خورشیدی یک محفظه با ارتفاع ۴ سانتی متر و طول ۶۰۰ میلیمتر (طول هر پله) از ورق گالوانیزه به قطر ۲ میلیمتر ساخته شده است. همچنین هر محفظه دارای سر شیری می باشد که قابلیت باز و بسته شدن به منظور ورود، خروج و تعویض نوع ماده تغییر فاز دهنده را داراست. همچنین برای جلوگیری از اتلاف انرژی زیر هر پله با عایق گرمایی الاستومری که یکی از روز ترین عایق های گرمایی - سرمای به شمار می رود پوشیده شده است تا انرژی ذخیره شده در مواد تغییر فاز دهنده از زیر پله ها هدر نرود.

۶-۲- فن مکنده

با توجه به اینکه هوایی که ما قصد مکش آن را داریم دارای بخار آب می باشد لذا به دلیل اینکه فن های محوری موتور هایی در راستای خود دارند بخار آب روی موتور آنها نشست و باعث سوختن فن می شود. از آن جاییکه فن محوری ضد آب در ابعاد مورد نیاز ما موجود نیست و فن های سانتریفیوژ نیز ابعاد بزرگی دارند و همچنین هرچه فن قوی تر باشد سرعت مکش نیز بیشتر است و این امر موجب می شود بخار قبل از تقطیر شدن از چگالنده خارج شود لذا محقق از یک پمپ کوچک که موتور آن در خارج از محفظه مکش قرار دارد به منظور مکش بخار استفاده کرده است که هر دو مشکل را حل کرده است. میزان مصرف برق این فن ۴۰ وات می باشد.

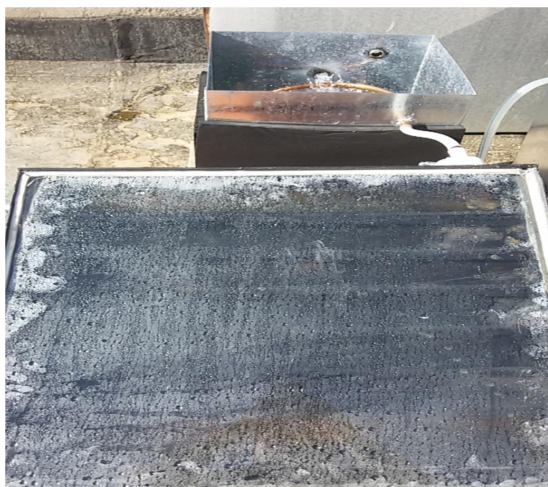
سطح آن ان به دمای مورد نیاز جهت تبخیر رسیده و با عبور از پله ها به صورت یکی پس از دیگری به مرور تبخیر می شود، تا به پایین تر پلکان رسیده و به خارج از دستگاه هدایت شود. جنس پلکان ها نیز از گالوانیزه بوده و پوششی از رنگ مشکی مات جهت جذب بیشتر گرمای حاصل از تابش خورشید روی آن قرار می گیرد. برای جلوگیری از کاتالیزه شدن آب و همچنین حرکت آب بر روی تمام سطح پلکان لبه ای به ارتفاع یک سانتیمتر بر روی قسمت جلویی پلکان قرار گرفته تا مانع از ریزش آب در قسمت های میانی پلکان شود و آب با برخورد با این لبه ها به سمت انتهایی پلکان هدایت و پس از سرریز شدن بر روی پله پایینی می ریزد و با طی طول پله در آن سوی پلکان به سطح پایین تر منتقل می شود دستگاه دارای ۷ پله به ارتفاع ۳۵ میلیمتر، عرض ۸۰ میلی متر و طول ۶۰۰ میلی متر می باشد که با استفاده از رنگ سیاه برای جذب بیشتر تابش خورشید، رنگ آمیزی شده است. شکل ۲ نیز به ترتیب عایق هر پله، ماده تغییر فاز دهنده و آب داخل هر پله را نمایش می دهد.



شکل ۲- طرحواره پلکان دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی قبل از نصب پوشش شیشه ای

۳-۲- شیشه

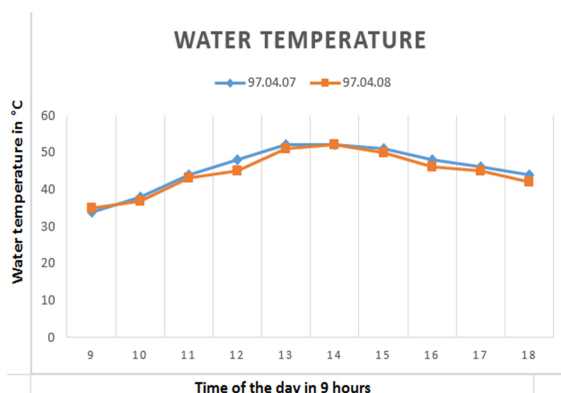
همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می شود برای ایجاد شرایط گلخانه ای که باعث به وجود آمدن بخار در محفظه دستگاه می شود، از شیشه برای پوشش روی سطح پلکانی استفاده شده است. این شیشه علاوه بر عبور دادن اشعه خورشید، کار تقطیر بخار تولیدی را نیز انجام می دهد. در قسمت انتهایی شیشه قطرات آب به داخل ظرف جمع کن آب شیرین در انتهای دستگاه ریخته می شوند. پوشش دستگاه، از شیشه ساده به ضخامت ۱۰ میلی متر می باشد. فاصله سطح جاذب با پوشش شیشه ای ۶۰ میلی متر می باشد و جهت جلوگیری از نشستی بخار آب به محیط، پوشش شیشه ای توسط درزگیر لاستیکی آب بندی شده است. با توجه به اینکه دستگاه از نظر عدم نشت آب و بخار، باید کاملاً آب بندی شود از نوعی چسب پلیمری سفید رنگ استفاده شده که کاملاً مقاوم و عایق مناسبی در مقابل نفوذ آب و رطوبت می باشد. تکمیل کار دستگاه همراه با عایق بندی و تست همراه با پاشش آب به سطوح مربوط و همچنین ریزش حجمی آب به قسمت های آب گیر دستگاه انجام و تمام منافذ و درزها با چسب مورد اشاره آب بندی و پوشش لازم انجام گرفت. (جدول ۱)



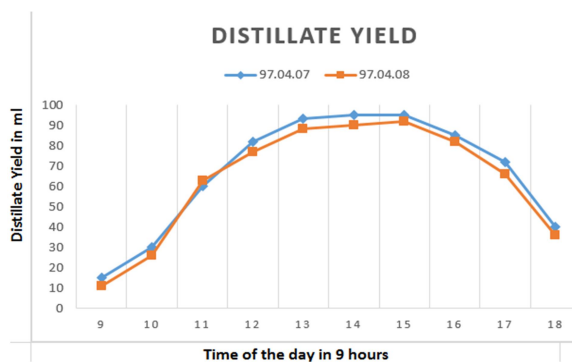
شکل ۶- آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه چگالنده و مواد تغییر فاز دهنده از نمایی دیگر

۳- آزمایش و نتایج

ابتدا آزمایش بر روی آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده صورت گرفت این آزمایشات به دلیل کمینه کردن هرگونه خطای دو روز با شرایط تقریباً یکسان انجام گرفته است. شکل ۷ درجه حرارت آب داخل پله‌های آب شیرین کن را نشان می‌دهد:



شکل ۷- دمای آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در مورخ ۱۳۹۷/۰۴/۰۸ و ۱۳۹۷/۰۴/۰۷



شکل ۸- میزان تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در مورخ ۱۳۹۷/۰۴/۰۸ و ۱۳۹۷/۰۴/۰۷

۲-۷- بدنه چگالنده

بدنه دستگاه از ورق گالوانیزه با قطر یک و نیم میلی‌متر ساخته شده است، دلیل آن مقاومت نسبی گالوانیزه در مقابل خوردگی است. با توجه به شکل خاص دستگاه، جداره های دستگاه برش های زاویه دار و شکسته دارد لذا برای برش های مورد نظر از قیچی ورق بر استفاده شده است. این دستگاه به دلیل اینکه باید لوله مسی را در خود جای دهد با ابعادی به طول ۴۰ سانتیمتر، عرض ۴۰ سانتی متر و ارتفاع یک متر ساخته شده است.

۲-۸- داخل چگالنده

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود هوای مکیده شده از آب شیرین کن خورشیدی توسط فن به داخل لوله مسی با قطر ۱۶ میلی متر که ۳ متر طول دارد فرستاده شده و با توجه به اینکه لوله مسی توسط آب احاطه شده است بخار آب تقطیر شده و به آب شیرین تبدیل می‌شود. علت انتخاب جنس مس برای لوله چگالنده ضریب انتقال گرمای بالای مس نسبت به سایر لوله ها مانند لوله‌های آلومینیومی، لوله های گالوانیزه می‌باشد.

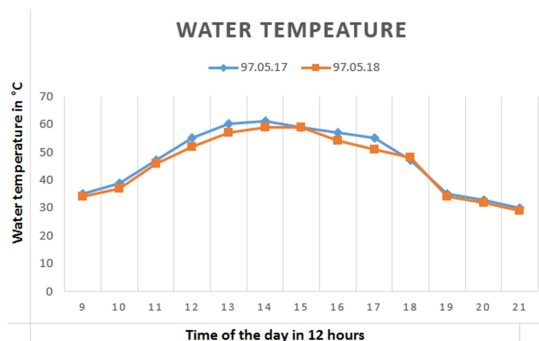


شکل ۴- آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده و مواد تغییر فاز دهنده

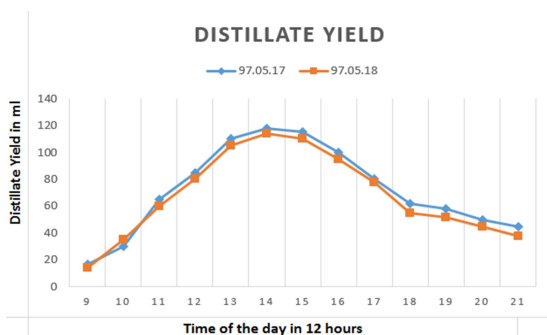


شکل ۵- لوله مسی ۱۶ میلی متری داخل چگالنده

شکل ۶ نیز نمایی از دستگاه در حین آزمایش را به نمایش گذاشته است.

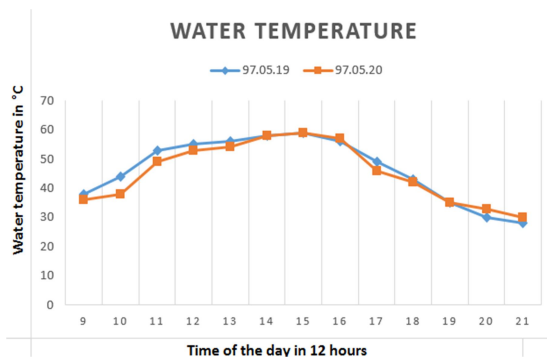


شکل ۱۱- دمای آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۱۷ و ۱۳۹۷/۰۵/۱۸



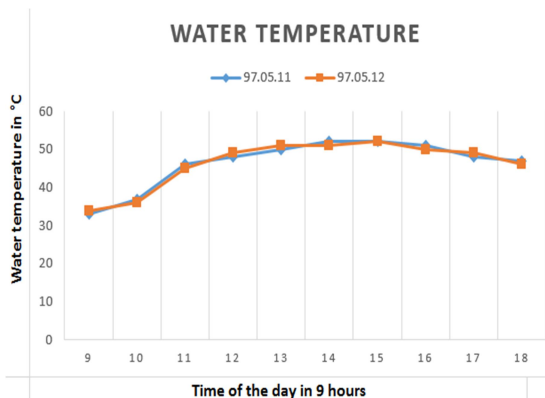
شکل ۱۲- میزان تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۱۷ و ۱۳۹۷/۰۵/۱۸

در آزمایش سوم همانطور که گفته شد از ماده تغییر فاز دهنده استتاریک اسید در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده در زیر هر پله استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میزان تولید در این حالت به طور میانگین ۹۱۰ میلی لیتر در روز می باشد که نسبت به حالت اول ۲۷۵ میلی لیتر یعنی ۴۳ درصد افزایش یافته است. روش آخر نیز تاثیر هر دو روش ذکر شده یعنی استفاده توأم از چگالنده خارجی، فن مکنده و ماده تغییر فاز دهنده استتاریک اسید بر نرخ تولید آب شیرین کن خورشیدی پلکانی را مورد بحث و بررسی قرار می دهد که نتایج آن در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آمده است.

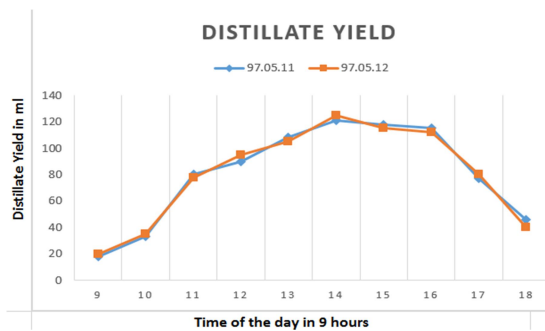


شکل ۱۳- دمای آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی و ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۱۹ و ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده به طور میانگین ۶۳۵ میلی لیتر در روز می‌باشد که در آزمایشات بعدی سعی شده نرخ تولید این آب شیرین کن را بهبود یابد. آزمایش دوم به بررسی تاثیر استفاده از چگالنده خارجی و فن مکنده بر بازده آب شیرین کن خورشیدی پلکانی بدون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌پردازد که دمای آب داخل دستگاه در شکل ۹ نشان داده شده است :



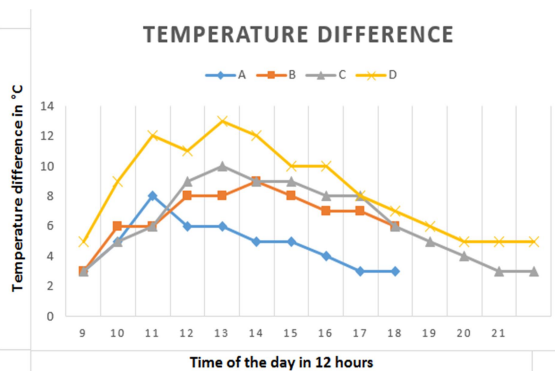
شکل ۹- دمای آب در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۱۱ و ۱۳۹۷/۰۵/۱۲



شکل ۱۰- میزان تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۱۱ و ۱۳۹۷/۰۵/۱۲

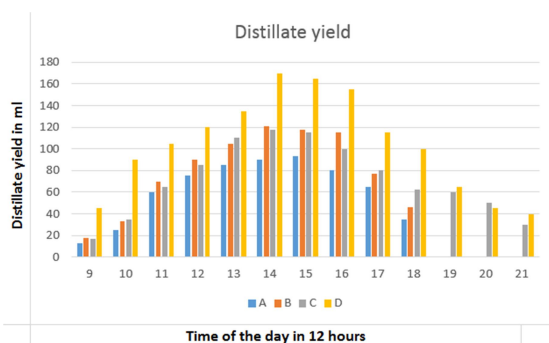
با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش دوم که از چگالنده خارجی همراه با فن مکنده در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده استفاده شد، نشان می‌دهد که تولید آب شیرین کن به طور متوسط ۸۰۰ میلی لیتر در روز می‌باشد که نسبت به آب شیرین کن خورشیدی پلکانی ساده ۱۶۵ میلی لیتر افزایش یافته است که ۲۶ درصد بیشتر از حالت اول می‌باشد.

روش سوم آزمایش نیز تاثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده استتاریک اسید بر نرخ تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی را در دو روز مختلف مورد بررسی قرار می دهد که نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد (شکل ۱۱ و ۱۲):



شکل ۱۵- اختلاف دما بین سطوح داخلی شیشه با آب تشتک در چهار حالت آزمایش

شکل ۱۶ ارتباط بین زمان در طول روز (برحسب ساعت) و میزان تقطیر دستگاه های مختلف مورد آزمایش را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می نمایید استفاده از چگالنده و فن ۲۶ درصد، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ۴۳ درصد و استفاده همزمان از فن مکند، چگالنده و ماده تغییر فاز دهنده تا ۱۰۴ درصد میزان تقطیر آب شور را افزایش می دهد.



شکل ۱۶- میزان آب تقطیر شده در طی روز برای حالات مختلف آزمایش

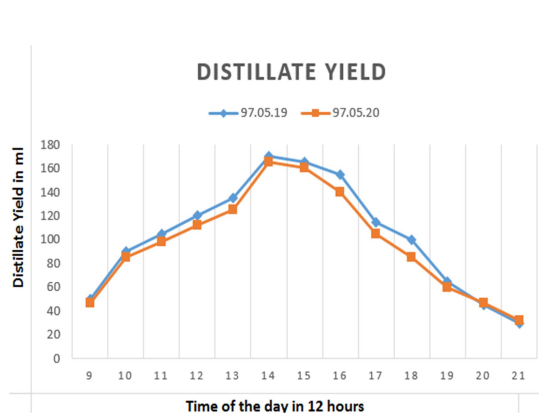
نمودار عدد ناسلت بر اساس عدد رایلی

$$Nu = \frac{h_{e,w} - h \times H}{k_w} = C(Gr, Pr)^n \quad (1)$$

$$Ra = Gr, Pr = \frac{g \times \beta \times H^3 \times (T_b - T_w)}{\nu^2} \quad (2)$$

مقادیر C و n در معادله بالا برای حالت های مختلف بصورت زیر است:

راستای جریان گرما	n	C
رو به بالا (سطح داغ رو به بالا)	۱/۴	۰/۵۴
رو به پایین (سطح داغ رو به پایین)	۱/۴	۰/۲۷



شکل ۱۴- میزان تولید آب تقطیر شده توسط آب شیرین کن خورشیدی پلکانی همراه با چگالنده خارجی و ماده تغییر فاز دهنده در مورخ ۱۳۹۷/۰۵/۲۰ و ۱۳۹۷/۰۵/۱۹

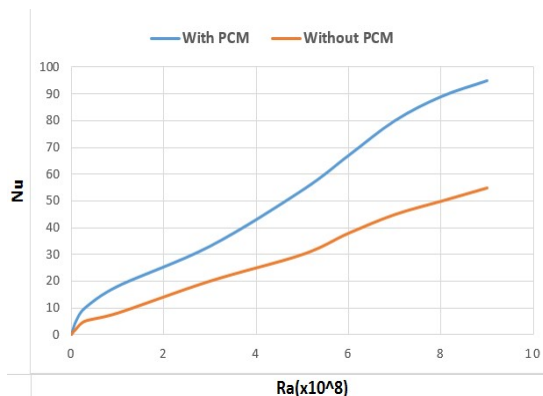
در نهایت نیز هدف اصلی این تحقیق که بررسی همزمان استفاده از چگالنده خارجی، فن مکند و ماده تغییر فاز دهنده در آب شیرین کن خورشیدی پلکانی بود، مورد آزمایش قرار گرفت. همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می شود میزان تولید دستگاه با استفاده از موارد ذکر شده به طور متوسط به ۱۳۰۰ میلی لیتر در روز رسیده است که این میزان نسبت به حالت اول ۶۶۵ میلی لیتر یعنی ۱۰۴ درصد، نسبت به حالت دوم ۵۰۰ میلی لیتر یعنی ۶۳ درصد و نسبت به حالت سوم ۳۹۰ میلی لیتر یعنی ۴۹ درصد افزایش داشته است.

میزان دقت دستگاه هایی که در این تحقیق از آن ها به منظور اندازه گیری پارامترهای مختلف از جمله دمای قسمت های مختلف آب شیرین کن، میزان تابش خورشید و میزان تولید آب شیرین استفاده شده، در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- دقت دستگاه های اندازه گیری آزمایش

شماره	دستگاه	دامنه	دقت
۱	سولارمتر	0 – 1000 W/m ²	±0.01 W/m ²
۲	ترموکوپل	0 °C-300 °C	±1 °C
۳	دماسنج لیزری	0 °C-150 °C	±0.01 °C
۴	بشر مدرج	0-2000 ml	±9 ml

شکل ۱۵ اختلاف دما بین سطح شیشه و دمای آب حوضچه آب شیرین کن را نشان می دهد. علت اصلی تولید آب شیرین در آب شیرین کن های خورشیدی نیز همین اختلاف دماست که همان گونه که قابل ملاحظه است در آزمایش آخر این اختلاف دما بدلیل استفاده از PCM در زیر پله ها و استفاده از فن، این اختلاف دما به بیشترین مقدار در بین این چهار حالت آزمایش رسیده است.



شکل ۱۷- نمودار عدد ناسلت بر اساس عدد رایلی همراه با ماده تغییر

فاز دهنده و بدون آن

همان گونه که در شکل ۱۷ مشخص است عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی در هر پله بین آب داخل پله و سطح پله محاسبه شده است که افزایش عدد ناسلت را با استفاده از PCM در مقایسه با زمانی که از PCM استفاده نشده، نمایش می دهد و در نتیجه آن ضریب انتقال گرما افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به میزان تولید آب شیرین کن خورشیدی پلکانی در ۴ حالت آزمایش، مشاهده می شود که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در زیر پلکان آب شیرین کن خورشیدی و همچنین استفاده از فن مکنده و چگالنده خارجی منجر به بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی شده است. این بهبود سه دلیل عمده دارد:

اول اینکه استفاده از ماده تغییر فاز دهنده زمان شیرین سازی آب را بالا می برد بدان معنا که بدون استفاده از ماده تغییر فاز دهنده فقط تا ساعت ۷ بعد از ظهر دستگاه قادر به شیرین سازی آب شور می باشد اما زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد ۳ ساعت به شیرین سازی آب افزوده می شود و تا ساعت ۹ شب می توان به شیرین سازی آب شور ادامه داد.

دوم اینکه زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده در آب شیرین کن خورشیدی استفاده می شود عدد ناسلت نسبت به زمانی که از این ماده استفاده نشده است افزایش چشمگیری پیدا می کند (شکل ۱۷). علت این افزایش این است که زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده می شود ضریب انتقال گرما یعنی (h) افزایش می یابد. با افزایش ضریب انتقال گرما عدد ناسلت نیز افزایش می یابد که این افزایش باعث بالا رفتن انتقال گرما بین تشتک و آب داخل آن شده لذا نرخ تولید دستگاه نیز افزایش می یابد.

در نهایت نیز استفاده از فن مکنده علاوه بر اینکه بخار آب ایجاد شده در دستگاه را به چگالنده منتقل کرده و باعث افزایش نرخ تولید بوسیله جلوگیری از بازگشت بخار آب به داخل آب شور می شود، با ایجاد فشار منفی و حتی خلاء نسبی در محفظه آب شیرین کن خورشیدی پلکانی باعث بالا رفتن نرخ تبخیر سطحی نیز می شود که عامل اصلی شیرین سازی آب شور می باشد و بازده دستگاه را افزایش می دهد.

۵- فهرست علائم

H عمق آب (mm)

h	ضریب انتقال گرمای جابجایی ($W/m^2.K$)
Gr	عدد گرافش
k_w	رسانایی گرمایی ($W/m.K$)
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رایلی
T_b	دمای تشتک ($^{\circ}C(K)$)
T_w	دمای آب درون پله ($^{\circ}C(K)$)
علائم یونانی	
β	ضریب انبساط حجمی گرمایی ($1/K$)
ν	لزجت سینماتیک (m^2/s)

۶- مراجع

- [۱] فرشچی تبریزی، ف.، بهینه سازی و بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی روستای کوشک بندر لنگه. *دانشگاه سیستان و بلوچستان، شرکت سهامی آب منطقه ای هرمزگان*، ۱۳۸۹.
- [۲] صادقی دستجردی م. و مقدس، م.، یافتن رابطه بین زاویه شیب بهینه گردآورهای لوله خلاء خورشیدی و عرض جغرافیایی. *فصلنامه علمی-ترویجی انرژی های تجدید پذیر و نو، سال سوم، ش. دوم، ص ۱۵-۲۳*، ۱۳۹۵.
- [۳] صفایی م. و معصوم بیگی ج.، روش های تصفیه و نمک زدایی آب های شور. *فصل نامه علمی- پژوهشی دفتر توسعه آموزش دانشکده بهداشت*. سال سیزدهم، ش. ۴۷، ص ۱۷-۲۸، ۱۳۸۸.
- [۴] ریسی م. و احمدی ف.، ذخیره سازی انرژی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آن در ساختمان. *همایش ملی انرژی*، ۱۳۹۴.
- [۵] شیخ جابری ف. و شریعتی نیاسر م.، استفاده از فناوری نانو در ذخیره سازی انرژی حرارتی، *ماهنامه فناوری نانو*، سال دهم، ش. ۴، ص ۱۶-۱۹، ۱۳۹۰.
- [۶] منصوری ش. و افشاری ا.، بررسی نقش مواد تغییر فاز دهنده در مدیریت مصرف انرژی ساختمان ها. *فصل نامه علمی-ترویجی انرژی های تجدید پذیر و نو، سال سوم، ش. ۲*، ص ۲۸-۳۸، ۱۳۹۴.
- [۷] سیف پور م.، نوری م. و مختاری ج.، مواد تغییر فاز دهنده و کاربرد آنها در منسوجات. *مجله علوم و فناوری نساجی*، سال اول، ش. ۱، ص ۱۹-۱۱، ۱۳۹۰.
- [۸] مسعودی ریحان م. و باباپور ع.، مروری بر مواد تغییر فاز دهنده به عنوان منبع ارزشمند انرژی. *کنفرانس انرژی های تجدید پذیر، پاک و کارآمد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، گروه مهندسی شیمی*، ۱۳۹۴.
- [۹] گچکاران آ. و جدا ف.، طراحی و بهینه سازی آب شیرین کن خورشیدی با ذخیره سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۱، ص. ۲۳۵-۲۴۴، ۱۳۹۸.
- [۱۰] خسروچردی س.، میر عبدالله لواسانی آ. و دلفانی ش.، تحلیل تجربی تاثیر صفحات گرافین اکساید آب دیونیزه بر عملکرد یک گردآورنده جذب مستقیم خورشیدی. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص. ۱۶۹-۱۷۷، ۱۳۹۷.
- [11] Gugulothua R. and Somanchia N.S., Vilasagarapua D. and Banoth H.B., Solar Water Distillation Using Three Different Phase Change Material. *4th International Conference on Materials Processing and Characterization, Proceedings 2*, pp. 1868 – 1875, 2015.
- [12] Naim M. and A.Abd El Kawi M., Non conventional solar stills part 2. Non conventional solar stills with energy storage element. *Desalination*, Vol. 153, pp. 71-80, 2002.

- [13] Nijmeh S., Odeh S. and Akash B., Experimental and theoretical study of a single basin solar still in Jordan. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 565-572, 2005.
- [14] El-Sebaei A.A., Al-Ghamdi A.A., Al-Hazmi F.S. and Faidah A.S., Thermal performance of a single basin solar still with PCM as storage medium. *Applied Energy*, Vol. 86, pp.1187-1195, 2009.
- [15] Al-Hamadani A.A.F. and Shukla S.K., Water Distillation Using Solar Energy System with Lauric Acid as Storage Medium. *International Journal of Energy Engineering* , Vol. 1, Issue 1, pp. 1-8, 2011.
- [16] Rajendra Prasad P., Padma Pujitha B., Venkata Rajeev G. and Vikky K., Energy efficient Solar Water Still. *International Journal of ChemTech Research (IJCRGG)*, Vol. 3, No. 4, pp. 1781-1787, 2011.
- [17] Swetha K. and Venugopal., Experimental Investigation of a Single sloped still using PCM. *International Journal of Research in Environmental Science and Technology*, Vol. 4, pp. 30-33, 2011.
- [18] Shobha B.S., Watwe V. and Rajesh A.M., Performance Evaluation of a Solar Still Coupled to an Evacuated Tube Collector Type Solar Water Heater. *International Journal of Innovation in Engineering and Technology (IJJET)*, Vol. 1, Issue 1, pp. 48-52, 2012.
- [19] Saravanan M. and Manikandan K., Experimental analysis of Single Slope Stepped Solar Still with and without Latent Heat Thermal Energy Storage System (LHTESS). *International Journal of Research in Environmental Science and Technology*, Vol. 4, pp. 92-95, 2012.
- [20] Agrawal S.S., Distillation of Water- Using Solar Energy with Phase Change Materials. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, Vol. 8, pp. 133-138, 2015.
- [21] Dashtban M. and Farshchi Tabrizi F., Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with PCM storage. *Desalination*, Vol. 22, pp. 279-415, 2011.
- [22] Kabeel A.E., El-Samadony Y.A.F. and El-Maghlany W.M., Comparative study on the solar still performance utilizing different PCM. *Desalination*, Vol. 432, pp. 89-96, 2018.
- [23] Chaichan M.T and Kazem K.A., Water solar distiller productivity enhancement using concentrating solar water heater and phase change material (PCM). *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 5, pp. 151-159, 2015.
- [24] Rabh K., Nciri R., Nasri F., Chaouki A. and Ben Bacha H., Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination*, Vol. 416, pp. 86-93, 2017.
- [25] Al-harashsheh M., Abu-Arabi M., Mousa H. and Alzghoul Z., Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 1030-1040, 2018.
- [26] Kabeel A.E., Abdelgaied M. and Abdel Aziz G.B., Modified pyramid solar still with v-corrugated absorber plate and PCM as a thermal storage medium. *Journal of Clear Production*, Vol. 161, pp. 881-887, 2018.