مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۸، شماره ۱۲۴، صفحات ۴۲-۴۸

بررسی مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی

محمدرضا عصاری[۱ و *]، حسن بصیرت تبریزی[۲]، علی کاوسی‌نژاد[۳]، سعید رحیمی[۴]

[۱] دانشیار دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دانشکده مهندسی مکانیک
[۲] استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک
[۳] مربی دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دانشکده مهندسی مکانیک
[۴] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی
*مسئول مکاتبات: mr_assari@yahoo.com

◄ چکیده

اساس شیرین‌سازی آب شور در خلاء بدین صورت می‌باشد که جوشش آب در فشار کمتر از اتمسفر و در نتیجه دمای بسیار پایین‌تر از حد نرمال اتفاق می‌افتد. دلیل آن این است که جوشش یک مایع زمانی اتفاق می‌افتد که فشار بخار برابر فشار محیط باشد. در نتیجه فشار بخار با دما افزایش می‌یابد. بنابراین به دلیل کاهش درجه حرارت انرژی گرمایی ذخیره می‌شود. در این تحقیق، مشخصات طراحی، بهره‌وری، و همچنین تحلیل مقایسه‌ای از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان که در دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است را پوشش می‌دهد. نتایج نشان داده است که عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان چه در سیستم‌های فعال و چه غیرفعال باعث افزایش بهره‌وری در طول شب می‌شود و کارایی بهتری نسبت به آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بدون مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان دارند، هرچند بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال بیشتر از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی غیرفعال می‌باشند.

◄ واژگان کلیدی

آب شیرین‌کن خورشیدی
ذخیره‌سازی انرژی
سیستم‌های خورشیدی فعال و غیر فعال
مواد تغییر فاز دهنده

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

۱ مقدمه

استفاده گسترده از کودهای شیمیایی در کشاورزی و رشد فعالیت‌های صنعتی باعث شده که آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی منجر شوند. تقریبا ۹۰ درصد از خطرات عمده سلامت در مناطق روستایی ناشی از نوشیدن آب آلوده است،که زنان و کودکان به طور کلی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند، زیرا آن‌ها به شدت مستعد ابتلا به بیماری‌های منتقله از بدن هستند. از ۵۰ – ۴۰ لیتر سرانه در روز از آب مورد نیاز برای مصرف داخلی، تنها ۲ لیتر سرانه در روز آب آشامیدنی است.

مقدار کل ۵ تا ۱۰ لیتر آب برای اهداف آشپزی و نوشیدنی مورد نیاز است. در نتیجه، فقط این مقدار آب است که نیاز به رعایت استانداردهای کیفیت سختگیرانه توسط سازمان بهداشت جهانی یا سایر سازمان‌های مشابه می‌باشد. در حالی که مقدار باقی مانده آب مورد نیاز برای شستشو و تمیز کردن می‌تواند کیفیت متوسط داشته باشد.

تأمین آب به مناطق دور افتاده از طریق خط لوله ممکن است بی فایده باشد و علاوه بر این، همچنین می‌تواند استفاده نادرست از آب با کیفیت بالا را در شستشو و تمیز کردن افزایش دهد. از این رو برای سیستم مدیریت آب مقرون به صرفه و پایدار، مهم است که آب را در سطح مناسب کیفیت، که به اندازه کافی در دسترس است با حداقل هزینه، تأمین شود. با رشد جمعیت، افزایش آلودگی به دلیل رشد صنعتی، حمل و نقل و غیره، منابع آب شیرین که در سطح زمین محدود می‌شوند، بسیار سریعتر خاموش می‌شوند [۱].

همچنین در صحرا، مناطق سنگی و خشک از جهان، بارندگی‌های متناوب رخ می‌دهد که منجر به کمبود آب‌های زیرزمینی می‌شود. این مشکلات ما را برای اختراع آب تازه یا آب آشامیدنی از منابع موجود مانند آب‌های زیرزمینی، آب دریا و ... توسط آب شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌رساند [۲].

همان اصل ابتدایی که در تولید بارندگی‌ها از طریق چرخه هیدرولوژیکی که در طبیعت اتفاق می‌افتد، در تمام سیستم‌های آب شیرین‌کن مصنوعی به منظور تولید آب شیرین از منابع شور استفاده می‌شود. حذف یا جداسازی نمک از آب به طور خودکار نمی‌تواند به دست آید اما در سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی با کمک برخی از منابع انرژی انجام می‌گیرد [۳].

در بیشتر موارد، استفاده مستقیم از آب دریا امکان‌پذیر نیست زیرا از انواع مختلف نمک ساخته شده است. تقطیرسازی و یا شیرین‌سازی آب شور یک فرایند حرارتی شناخته شده برای تصفیه آب شور و شیرین‌سازی آن می‌باشد. اکثر روش‌های تصفیه آب انرژی زیادی را مصرف می‌کنند که برای شیرین‌سازی آب شور نیاز به سوخت‌های فسیلی یا برق دارند.

انرژی خورشیدی می‌تواند برای تولید آب شیرین به طور مستقیم در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی یا به طور غیر مستقیم، جایی که انرژی حرارتی از یک سیستم انرژی خورشیدی به آب شیرین‌کن خورشیدی تحویل داده می‌شود، استفاده کرد. یکی از راه‌های افزایش بهره برداری از انرژی خورشیدی، جمع آوری انرژی در طول ساعات آفتابی از بروز تابش نور خورشید می‌باشد. فن آوری ذخیره‌سازی مؤثر برای ذخیره انرژی در چرخه ۲۴ ساعته نیاز است.

ذخیره‌سازی انرژی در طول دوره شبانه انرژی خود را آزاد می‌کند. ذخیره انرژی حرارتی شامل تغییر برگشت‌پذیری آنتالپی ماده ذخیره‌سازی انرژی گرمایی است. این تکنولوژی به خصوص از لحاظ ترمودینامیکی و اقتصادی امیدوار کننده است.

آب شیرین‌کن خورشیدی از گرمای خورشید به طور مستقیم در یک سیستم ساده برای شیرین‌سازی آب استفاده می‌کند. این ابزار، که معمولاً به عنوان آب شیرین‌کن خورشیدی نامیده می‌شود، عمدتا حاوی یک حوضچه کم عمق با پوشش شیشه‌ای شفاف است.

تابش خورشیدی آب را در حوضچه گرم می‌کند و باعث تبخیر می‌شود. رطوبت بر روی پوشش افزوده و چگالش می‌شود و در یک قسمتی از کلکتور ذخیره می‌شود، که مواد معدنی، نمک و بسیاری از آلاینده‌ها، از جمله میکروب‌ها را ترک می‌کند. طبقه‌بندی فرایند آب شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۱ آمده است [۴].

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به طور گسترده‌ای به آب شیرین‌کن‌های خورشیدی غیر فعال و فعال طبقه‌بندی می‌شوند [۵] مواد ذخیره‌ساز حرارتی نهان اساسی‌ترین جزء آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. همچنین پارامترهای مهم که بر بهره‌وری یک آب شیرین‌کن خورشیدی تأثیر می‌گذارد، مانند شدت تابش خورشید و حجم آب‌های حوضچه [۶]، سرعت باد [۷]، پیشنهاد شده است. عملکرد آب شیرین‌کن با لایه‌های نازک آب افزایش می‌یابد [۶]. با این حال، افزایش ضخامت آب حوضچه موجب کاهش بهره‌وری یک شبه آب شیرین‌کن می‌شود [۸].

۲ مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

PCM (Phase Change Material) به مواد تغییر فاز دهنده گفته می‌شود. این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره نهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در طی فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد.

این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچگونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ نماید. این مواد در صورت استفاده در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، از طریق چرخه‌های متوالی ذوب و انجماد در تغییرات شدید دمای هوا (مثلا بین شب و روز)، مقادیر زیادی گرما را با محیط تبادل نموده و از این طریق دمای سیستم را در نبود تابش خورشیدی تأمین می‌کند.

کاربردهای دیگر مواد تغییر فاز دهنده، برای ذخیره انرژی حرارتی، ساختمان حرارتی و کاربردهای خنک کننده [۹–۱۲]، خشک کردن خورشیدی محصولات کشاورزی [۱۳–۱۸]، و سایر برنامه‌های کاربردی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مواد تغییر فاز دهنده به پارافین و اسیدهای چرب، مواد معدنی، هیدرات‌های نمک، مواد ترکیبی، مواد جاذب رطوبت طبقه‌بندی می‌شوند.

۱.۲ انتخاب ماده تغییر فاز دهنده مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی

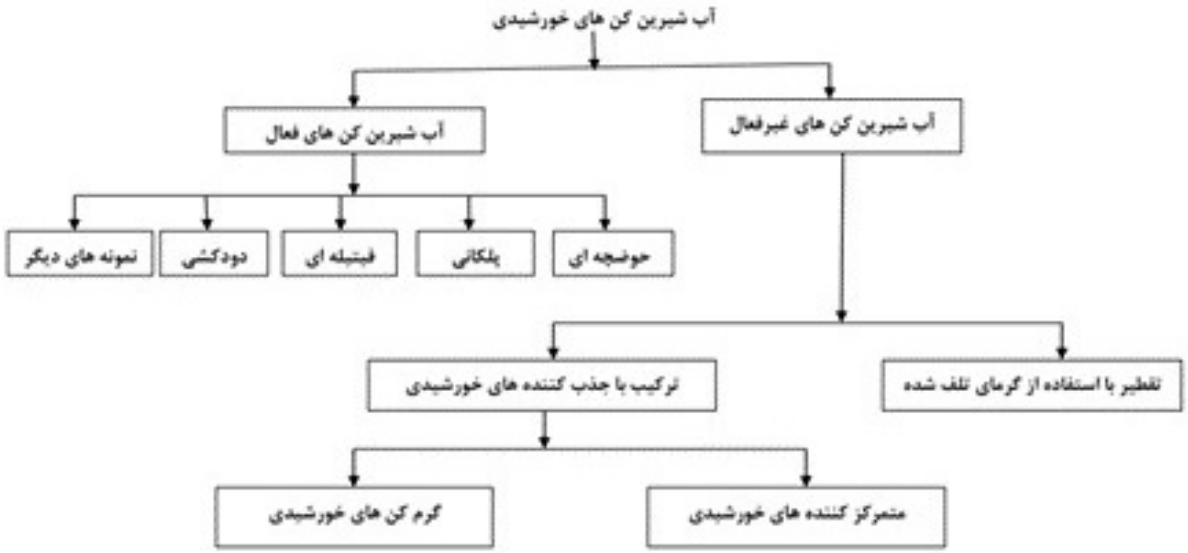
اگر چه این واقعیت که کارهای بسیار زیادی در انتخاب ماده تغییر فاز دهنده به عنوان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در بخش‌های مختلف در طول دو دهه گذشته انجام شده است. یک مسئله کلیدی که بر انتخاب ماده تغییر فاز دهنده تاثیر می‌گذارد، قابلیت کاربرد محدوده دما برای انتقال فاز ماده می‌باشد، به طوری که ماده تغییر فاز دهنده نه تنها به طور مؤثر باعث جذب گرمای بیش از حد از آب می‌شود، بلکه سرعت گرما را به رسانه‌های دیگر مانند آب و هوا منتقل می‌کند. باید توجه داشته باشیم که برخی از مواد تغییر فاز دهنده امکان خوردگی و مواد دیگر را از بین می‌برند. مطالعات جامع در مورد روش‌های حفاظت از خوردگی و اثربخشی آن‌ها، مشارکت‌های تحقیق قابل توجهی را نشان می‌دهد. تحقیقات بیشتر می‌تواند ایجاد انتخاب‌های بهتری از ماده تغییر فاز دهنده که با برنامه‌های کاربردی خاص با ویژگی‌های مناسب ترموفیزیکی، حداقل اثر محیطی، قیمت پایین، دسترسی تجاری و ثبات عملیاتی دراز مدت مطابقت دارد، متمرکز شود.

۳ بررسی آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی گرمای نهان

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بر اساس طراحی و ساختار طبقه‌بندی می‌شوند. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به دو نوع سیستم‌های فعال و غیرفعال تقسیم بندی می‌شوند. سیستم‌های فعال به منابع خارجی، مانند گرمازدایی از صنایع و کلکتورهای خورشیدی، متصل می‌شوند،سیستم‌های غیرفعال از گرمای داخلی برای تبخیر استفاده می‌کنند. بررسی انواع مختلف آب شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال و غیر فعال با ذخیره‌سازی گرمای نهان در ادامه شرح داده می‌شود.

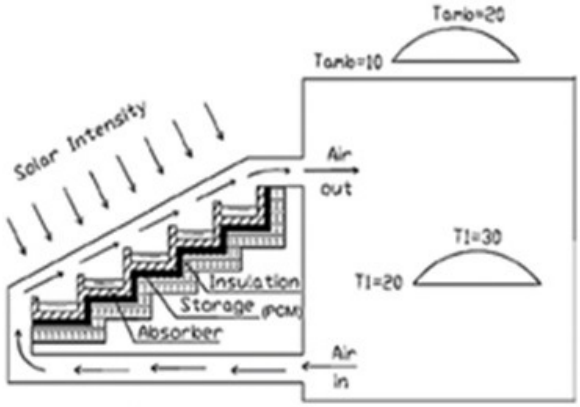
۱.۳ آب شیرین‌کن خورشیدی غیرفعال با ذخیره‌سازی گرمای نهان

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی غیرفعال، به سیستم‌هایی گفته می‌شود که مستقیم از گرمای نور خورشید برای تبخیر آب و سپس بخار آب میعان استفاده می‌شود. در چرخه‌ی باران این فرایند به صورت طبیعی انجام می‌شود. این روند فقط توسط انرژی خورشید صورت می‌گیرد. ساختار اینگونه سیستم‌ها همانند روند تولید ابر و باران در طبیعت است. گرمای خورشید آب درون محفظه سیستم را گرم و بخار کرده و در حین بخار سازی، نمک، آلودگی و دیگر مواد اضافه از ملکول‌های آب جدا می‌شوند. آب شیرین‌کن‌های غیرفعال به دو گونه حوضچه‌ای و شیب دار گروه بندی می‌شوند. در ادامه چند نمونه از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی غیرفعال با و بدون مواد تغییر فاز دهنده را بررسی و مقایسه می‌کنیم. آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با ذخیره انرژی حرارتی نهان، برای گرم کردن و رطوبت از گلخانه‌های کشاورزی در مناطق دور افتاده، توسط رادهوان و همکاران [۱۹] طراحی و ساخته شده است، که



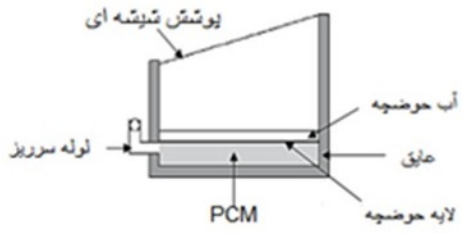
شکل ۱: طبقه‌بندی فرایند آب شیرین‌کن خورشیدی [۴].

در شکل ۲ نشان داده شده است. آب شیرین‌کن خورشیدی شامل پنج پله حوضچه‌ای با پوشش شیشه‌ای شیبدار پوشیده شده است و در قسمت پایین آن عایقی بر روی لایه پارافین (ماده تغییر فاز دهنده) قرار دارد که به عنوان یک رسانه ذخیره‌سازی انرژی حرارتی عمل می‌کند. عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره انرژی گرمای نهان مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با موردی که آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ذخیره انرژی گرمای نهان می‌باشد مقایسه شده است. سیستم کارایی ۵۷ درصد و عملکرد روزانه آن ۴/۶ لیتر بر متر مربع است. مشخص شد که رطوبت نسبی هوا در گردش تقطیرساز در حال بهبود است و همیشه در شرایط اشباع قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که کاهش سرعت جریان هوا تأثیر ناچیزی بر بازدهی تقطیرساز دارد در حالی که افزایش گرما در گلخانه‌ها کاهش می‌یابد. برای انتخاب طراحی و پارامترهای عملیاتی، تقطیرساز قادر به تأمین حرارت گلخانه برای ۲۴ ساعت / روز است. این یافته بسیار قابل توجه است، زیرا گرما را می‌تواند شبانه روز در گلخانه و زمانی که بیشتر مورد نیاز است، قرار داد.



شکل ۲: پیکربندی کلی از آب شیرین‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان(غیر فعال) [۱۹].

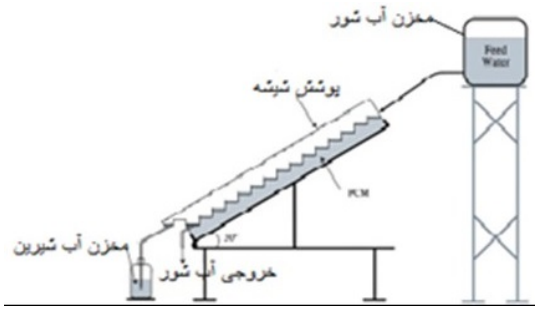
یک مدل ریاضی گذرا توسط سبائی و همکاران (۲۰۰۹) برای یک آب شیرین‌کن خورشیدی از نوع حوضچه‌ای تک شیب، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با و بدون ذخیره‌سازی گرمای نهان در قسمت زیرین آب شیرین‌کن حوضچه‌ای توسعه یافته است [۲۰]. اسید استئاریک به عنوان ماده تغییر فاز دهنده برای محاسبه عددی در روزهای معمول تابستان و زمستان در جده عربستان سعودی مورد استفاده قرار گرفت. مشخص شد که بهره‌وری روزانه با افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده کاهش می‌یابد اما بازدهی یک شبه به طور قابل توجهی با افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده به علت افزایش مقدار حرارت موجود در ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت به علت انتقال از حوضچه آبریز به آب حوضچه در طول فرایند تخلیه ماده تغییر فاز دهنده دو برابر شده است. بنابراین، ضریب انتقال حرارت تبخیری با استفاده از ۳/۳ سانتی متر اسید استئاریک در زیر سطوح حوضچه، ۲۷ درصد افزایش یافت. از این رو در روز تابستان ارزش روزانه ۹/۰۰۵ (کیلوگرم بر مترمربع در روز) با بهره‌وری روزانه ۸۵/۳ درصد در مقایسه با نرخ ۴/۹۹۸ (کیلوگرم برمتر مربع در روز) در زمانی که تقطیرساز بدون ماده تغییر فاز دهنده عمل می‌کرد، به دست آمده است.



شکل ۳: آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب حوضچه‌ای با مواد تغییر فاز دهنده [۲۰].

تبریزی و همکاران (۲۰۱۰) دو عدد آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با و بدون سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان را که در شکل ۴ نشان داده شده است ساختند [۲۱]. موم پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده انتخاب شده است که به عنوان ذخیره‌سازی گرمای نهان عمل می‌کند. برای افزایش زمان ماندن آب بر روی هر حوضچه از لبه سرریز استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بازده کل تقریبا برای هر دو آب شیرین‌کن‌ها برای یک روز

آفتابی معمولی یکسان است. با این حال، برای یک روز نیمه ابری، بهره‌وری آب شیرین‌کن با ذخیره‌ساز گرمای نهان به میزان قابل توجهی بالاتر است. بنابراین، آب شیرین‌کن بدون ذخیره‌سازی گرمای نهان برای مناطق آفتابی به دلیل سادگی آن و هزینه‌های ساخت و ساز کم،در حالی که آب شیرین‌کن با ذخیره‌سازی گرمای نهان به علت بهره‌وری بالاتری برای مناطق نیمه ابری، مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۴: نمایش مقطعی از یک آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی با ماده تغییر فاز دهنده [۲۱].

یک نوع آب شیرین‌کن خورشیدی پلکانی،با سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان، برای افزایش بهره‌وری آب شیرین توسط دشتبان و تبریزی (۲۰۱۱)، طراحی و ساخته شده است [۲۲]. با استفاده از یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان با وزن ۱۸ کیلوگرم (دارای ضخامت ۲ سانتی متر) از موم پارافین در زیر صفحه جذب، دمای کار را به اندازه کافی بالا نگه می‌دارد تا تولید آب شیرین را در هنگام غروب آفتاب، به ویژه در شب، نگه دارد. علاوه بر این، مدل‌های نظری برای آب شیرین‌کن خورشیدی با و بدون ماده تغییر فاز دهنده توسعه داده شد، و نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی برای مدل‌سازی حرارتی توسعه یافته مقایسه شد.

تحقیقات نظری برای محاسبه سطح آب بر روی صفحه جذب و فاصله بین آب و سطح شیشه‌ای انجام شده است که بر عملکرد سیستم آب شیرین‌کن تاثیر می‌گذارد. عملکرد مداوم با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و بدون آن در یک روز معمولی در زاهدان، ایران مورد مطالعه قرار گرفت. بهره‌وری روزانه آب شیرین‌کن خورشیدی به صورت تئوری، ۶/۷ و ۵/۱ کیلوگرم بر مترمربع در روز با و بدون ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب محاسبه شده است، و مشاهده شد که آب شیرین‌کن خورشیدی با ماده تغییر فاز دهنده بهره‌وری ۳۱درصد بالاتر از سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ماده تغییر فاز دهنده دارد. یک تحقیق تجربی در رابطه با آب شیرین‌کن خورشیدی با اسید لوریک به عنوان ماده تغییر فاز توسط الحمدانی و شولا (۲۰۱۲)، برای بررسی تأثیر هر دو جرم ماده تغییر فاز دهنده و آب حوضچه بر تولید روزانه آب شیرین‌کن و کارایی سیستم در شرایط بیرونی انجام شد [۲۳]. بررسی آزمایش مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. معادلات تعادل انرژی برای پیش بینی دمای آب و شیشه، بهره‌وری روزانه آب شیرین‌کن و بازدهی لحظه‌ای سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی تنها با ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. نتایج نشان داد که جرم بالاتری از ماده تغییر فاز دهنده با یک مقدار کم آب در حوضچه آب شیرین‌کن خورشیدی، بهره‌وری روزانه را بالاتر می‌برد، و کارایی و بهره‌وری آب شیرین‌کن در زمان شب و روز برای آب شیرین‌کن خورشید با ماده تغییر فاز دهنده افزایش ۱۲۷ درصد و ۳۰–۳۵ درصد نسبت به آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ماده تغییر فاز دهنده دارد.

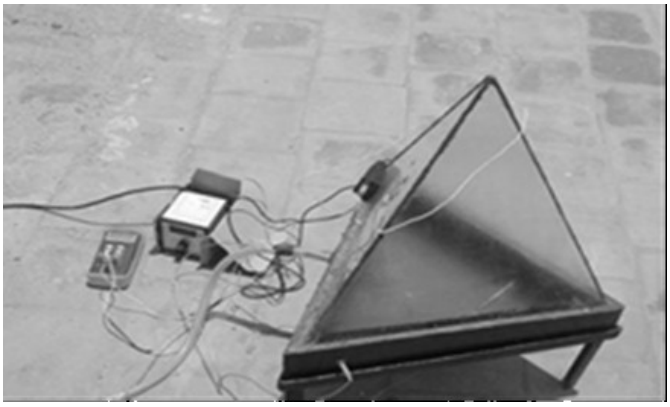
شکل ۵: آب شیرین‌کن با ماده تغییر فاز دهنده (سمت راست) آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ماده تغییر فاز دهنده (سمت چپ) [۲۳].

کانتش (۲۰۱۲)، یک آب شیرین‌کن خورشیدی با شیب دوگانه با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان طراحی و ساخته شده است [۲۴]، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای بررسی اثر استفاده از ماده تغییر فاز دهده در آب شیرین‌کن خورشیدی برای افزایش بهره‌وری از آب شور است. این مطالعه بر روی استفاده از ماده تغییر فاز دهنده (قیر) برای ذخیره انرژی حرارتی خورشیدی در قالب حرارت نهان تمرکز دارد که ظرفیت ذخیره انرژی گرمایی را در واحد حجم و در واحد جرم ارائه می‌دهد. انرژی ذخیره شده را می‌توان برای هدف شیرین‌سازی آب شور در شب استفاده کرد. از تحقیقات تجربی، کارایی آب شیرین‌کن خورشید بدون ماده تغییر فاز دهنده حدود ۲۵/۱۹٪ و در حضور ماده تغییر فاز دهنده (قیر) ۲۷٪ می‌باشد.

شکل ۶: آب شیرین‌کن خورشیدی باشیب دوگانه همراه با ماده تغییر فاز دهنده [۲۴].

سازیامورفی و همکاران (۲۰۱۴)، روش بهبود افزایش عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی هرمی مثلثی شکل ۷ را با و بدون ماده تغییر فاز دهنده ارائه کرد [۲۵]. برای مقایسه بهره‌وری از آب شیرین‌کن خورشیدی با و بدون سیستم ذخیره‌سازی حرارت نهان، آب شیرین‌کن خورشیدی هرمی مثلثی طراحی و ساخته شده است. با استفاده از موم پارافین به عنوان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، آزمایش‌ها در محیط گرم و مرطوب چنای، هند انجام شد. در طول روزهای آفتابی، بهره‌وری ساعتی در مقایسه با آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، کمی بالاتر بود. از نتایج بدست آمده مشخص شده است که تولید آب شیرین از آب شیرین‌کن خورشیدی با

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان تا ۳۵٪ در مقایسه با آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. علاوه بر این از نتایج بدست آمده مشخص شده است که در ساعات غروب آفتاب، بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره گرمای نهان در مقایسه با آب شیرین‌کن خورشیدی بدون ذخیره انرژی گرمایی، بالاتر است. در تابستان و زمستان، میزان بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی ۴/۵ لیتر بر مترمربع در روز و ۳/۵ لیتر برمترمربع در روز،به ترتیب،می باشد. بازده روزانه آب شیرین‌کن خورشیدی با و بدون ماده تغییر فاز دهنده، ۳/۴ لیتر بر مترمربع در روز و ۲/۳ لیتربر مترمربع در روز، به ترتیب، می‌باشد.

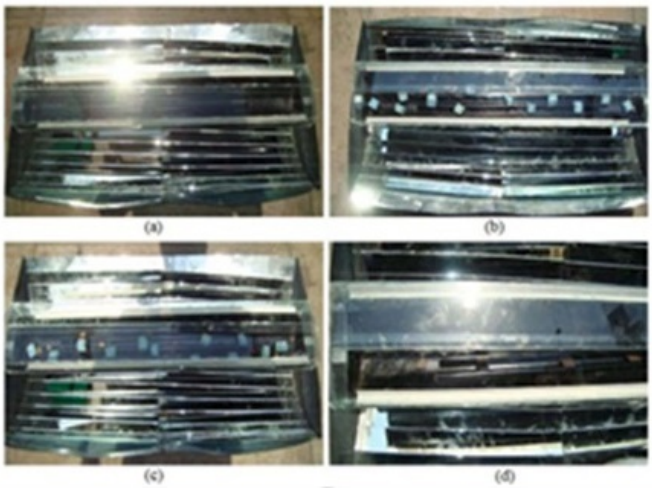


شکل ۷: آب شیرین‌کن خورشیدی نوع هرمی [۲۵].

۲.۳ آب شیرین‌کن خورشیدی فعال با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان

مشکل اصلی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی غیرفعال دریافت تابش مستقیم خورشید توسط حوضچه آب شور، که تنها منبع برای افزایش دمای آب می‌باشد.برای رفع این مشکل سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی فعال توسعه پیدا کردند. این نوع سیستم‌ها با یک منبع گرمایی اضافی توسط یک منبع خارجی به سیستم اضافه شده است. این منابع گرمایی اضافی بیشتر در کف حوضچه‌ها قرار می‌گیرند به دلیل اینکه میزان تابش جذب شده توسط حوضچه‌های پایینی کمتر از حوضچه‌های بالاتر از آن است. در این نوع سیستم‌ها بیشتر از یک پوشش شیشه‌ای وجود دارد. در ادامه چند نمونه از این سیستم‌ها را با و بدون مواد تغییر فاز دهنده بررسی و مقایسه خواهیم کرد.

چندر و همکاران (۲۰۱۱)، چهار نوع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی را توسعه دادند که در شکل ۸ نشان داده است [۲۶]. در این تحقیق، آب شیرین‌کننده با متمرکز انرژی حرارتی خورشیدی از طریق یک غلاف سهمی وار و موم پارافین به عنوان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای بهبود سرعت تبخیر از سیستم انجام شد. به منظور بهبود تبخیر بیشتر از حوضچه‌هایی با عمق کم استفاده شده است. منطقه تبخیر و همچنین نرخ تبخیر با استفاده از اسفنج‌ها به علت اقدام مویرگی افزایش یافته است. با اضافه کردن سنگریزه‌ها، بهره‌وری آب شیرین‌کن،به علت ظرفیت گرمای بیشتر سنگریزه، همچنان افزایش می‌یابد. بولت‌های فولادی ملایم دارای هدایت گرمائی بالا می‌باشند که باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی گرما در حوضچه می‌شود. اندازه گیری‌های بهره‌وری خارج از میلی لیتر دربین ساعت ۱۰ قبل از ظهر و ۵ بعدازظهر انجام شد و ثبت شده است که بهره‌وری آب شیرین‌کن تا ۵۴٪ بهبود یافته است.

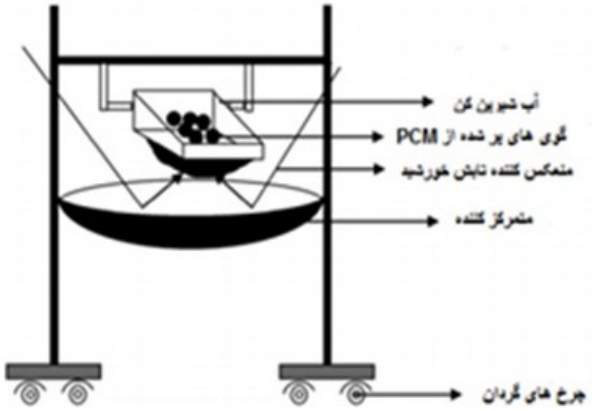


شکل ۸: شماتیک آب شیرین‌کن خورشیدی: (a) آب شیرین‌کن خورشیدی با پارافین واکس (b) آب شیرین‌کن خورشیدی با موم پارافین و اسفنج‌ها (c) آب شیرین‌کن خورشیدی با واکس پارافین و سنگریزه (d) آب شیرین‌کن خورشیدی با موم پارافین و بیلس‌های استیل [۲۶].

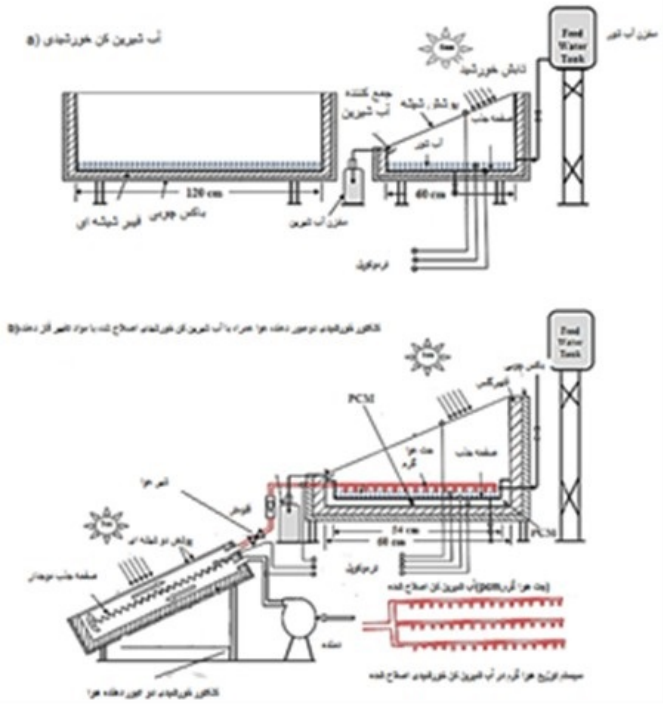
به منظور افزایش کارآیی و عملکرد آب شیرین‌کن با متمرکز کننده همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی نوع حوضچه نیمکره ای، مواد تغییر فاز دهنده توسط ارونکومار و همکاران (۲۰۱۳)، اضافه شده است [۲۷]. دو حالت عملیاتی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب دار بدون اثر ماده تغییر فاز دهنده و (۲) آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب دار با اثر ماده تغییر فاز دهنده. تنظیم آزمایش و گوی‌های پرشده از ماده تغییر فاز دهنده در شکل ۹ نشان داده شده است. دمای آب، دمای ماده تغییر فاز دهنده، دمای هوا، دمای پوشش داخلی، دمای پوشش خارجی، اندازه گیری شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که اثر ذخیره‌ساز حرارتی در متمرکز کننده همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی حوضچه نیمکره‌ای همچنان تولید را ۲۶٪ افزایش می‌دهد. به این نتیجه رسیدیم که بهره‌وری به طور قابل ملاحظه‌ای به دلیل اینکه آب شیرین‌کن با ماده تغییر فاز دهنده یکپارچه شده است، افزایش می‌یابد.

دو عبورکننده کلکتور خورشیدی هوا همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با ماده تغییر فاز دهنده همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، آزمایش‌های تجربی برای غنی سازی بهره‌وری آب شیرین توسط کبیل و همکاران (۲۰۱۶)، مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۸]. اثر هوای تزریق شده از کلکتور خورشیدی هوا بر عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها در همان شرایط جوی با هوای گرم تزریق شده به آب شیرین‌کن خورشیدی انجام شد. از این آزمایش یافتیم که بهره‌وری آب شیرین تقریبا به ۹/۳۶ (لیتر بر مترمربع در روز) برای دو عبورکننده کلکتور خورشیدی هوا به آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با ماده تغییر فاز دهنده، هر چند بهره‌وری آن ۴/۵ (لیتر بر مترمربع در روز) برای آب شیرین‌کن خورشیدی بدون کلکتور هوا و ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. علاوه بر این یافتیم که بهره‌وری آب شیرین از دو

عبورکننده خورشیدی همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با ماده تغییر فاز دهنده بطور متوسط ۱۰۸٪ بالاتر از حد متعارف آب شیرین‌کن است. این درصد در طول دوره ژوئن تا ژوئیه ۲۰۱۵ تحت شرایط هواشناسی مصر به دست آمده است.



شکل ۹: مشخصات فیزیکی: الف)متمرکز کننده همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب با حوضچه نیم کره‌ای ب)گوی‌های مسی پر شده از ماده تغییر فاز دهنده [۲۷].



شکل ۱۰: شماتیک دو عبور کننده کلکتور خورشیدی هوا همراه با آب شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با ماده تغییر فاز دهنده و آب شیرین‌کن خورشیدی متمرکز شده [۲۸].

۴ پیشنهاد و دستورالعمل پژوهش آینده

اگر چه کارهای قابل توجهی در زمینه آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نهان انجام شده است اما تلاش‌های بیش از حد برای ارتقای بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی همچون فن آوری‌های در حال ظهور برای چنین سیستم‌هایی ضروری است. تحقیقات بیشتری در زمینه‌های زیر ممکن است برای نسل بعدی آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره انرژی حرارتی نهان مفید باشد.با توجه به مطالعه سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، پیشنهاداتی برای آزمایشات آینده بصورت زیر ارائه داده می‌شود:

- یکی از مشکلات برای افزایش جذب تابش‌های خورشیدی، از رنگ سیاه مات استفاده می‌شد. اگر چه مقاومت‌ای رنگ‌ها در برابر تماس با آب شور بالا می‌باشد، اما به مرور زمان در اثر انبساط و انبقاض صفحه جذب کننده باعث ترک و پوسیدگی آن می‌شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل از صفحه جذب‌هایی استفاده شود که ضریب جذب بالا داشته و نیاز به رنگ کردن نداشته باشند. این صفحه جذب کننده‌ها را می‌توان به کمک آنادایز کردن صفحه‌های آلومینیومی اشاره نمود.
- در هنگام آزمایش دو سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی می‌توان آن‌ها را بصورت متوالی قرار داد طوری که خروجی سیستم اول به ورودی سیستم دوم متصل شود.
- برای افزایش بهره‌وری آب شیرین، خروجی آب شور سیستم را به وسیله پمپ برای ورودی آب شور به سیستم استفاده کرد.
- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده جامد و متناسب با دمای محیط

۱.۴ طراحی، توسعه و بهینه‌سازی سیستم

آب شیرین‌کن خورشیدی با ذخایر گرمای نهان تقطیرساز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، با وجود اینکه کارهای قابل توجهی انجام شده است. علاوه بر کار بیشتر باید روی از بین بردن عوارض سیستم‌های موجود و ایجاد کیفیت بهتر یا نمونه‌های جدید سیستم بهینه‌سازی شده تمرکز کند. علاوه بر این، هر سیستم جدید طراحی شده، که فرصتی برای موفقیت داشته باشد، باید در هنگام بهره برداری انرژی کارامد و هزینه‌ای مقرون به صرفه داشته باشد.

۵ نتیجه‌گیری

همانطور که تقاضای آب تازه روز به روز به دلیل رشد سریع از لحاظ جمعیت و توسعه صنعتی، افزایش یافته است. شیرین‌سازی آب شور بوسیله آب شیرین‌کن خورشیدی، روند اقتصادی آرام برای شیرین‌سازی آب شور در سراسر جهان دارد. انواع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با و بدون ذخیره‌سازی گرمای نهان در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است که جنبه‌های مختلف طراحی آن را پوشش می‌دهد. این مقاله، یک مرور کلی جامع از تکنولوژی آب شیرین‌کن خورشیدی مبتنی بر ماده تغییر فاز دهنده را ارائه می‌دهد و می‌توان گفت که بهره‌وری از آب شیرین‌کن خورشیدی می‌تواند با استفاده از ذخیره‌سازی گرمای نهان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته لذا سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی فعال با مواد تغییر فاز دهنده بهره‌وری بیشتری نسبت دیگر سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی دارد و چنین سیستم‌هایی می‌توانند برای زمان بزرگتر استفاده شوند. وضعیت فعلی تحقیق در رابطه با این تکنولوژی خلاصه شده است و برخی از مسیرهای آینده برای تحقیق و توسعه بیشتر نیز پیشنهاد شده است. اگر چه تلاش‌های صادقانه برای توسعه تکنولوژیکی چنین آب شیرین‌کن‌های خورشیدی صورت می‌گیرد،

افزایش آگاهی اجتماعی برای استفاده از چنین فن آوری‌های موجود می‌تواند باعث تقویت نسل بعدی ماده تغییر فاز دهنده مبتنی برآب شیرین‌کن‌های خورشیدی شود.

مراجع

[1] Tiwari, GN, Singh, HN, and Tripathi, Rajesh. Present status of solar distillation. *Solar energy*, 75(5):367–373, 2003.

[2] Park, Soo-Jin, Choi, Wonsik, Kim, Jae-Jin, Kim, Minjoong J, Park, Rokjin J, Han, Kyung-Soo, and Kang, Geon. Effects of building–roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon. *Building and Environment*, 109:175–189, 2016.

[3] Qiblawey, Hazim Mohameed and Banat, Fawzi. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220(1-3):633–644, 2008.

[4] Shukla, SK. Application of solar distillation systems with phase change material storage. in *Modern Mechanical Engineering*, pp. 15–42. Springer, 2014.

[5] Kumar, P Vishwanath, Kumar, Anil, Prakash, Om, and Kaviti, Ajay Kumar. Solar stills system design: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 51:153–181, 2015.

[6] Nafey, A Safwat, Abdelkader, M, Abdelmotalip, A, and Mabrouk, AA. Parameters affecting solar still productivity. *Energy Conversion and Management*, 41(16):1797–1809, 2000.

[7] El-Sebaii, AA. Effect of wind speed on active and passive solar stills. *Energy Conversion and Management*, 45(7-8):1187–1204, 2004.

[8] Aboul-Enein, S, El-Sebaii, AA, and El-Bialy, E. Investigation of a single-basin solar still with deep basins. *Renewable Energy*, 14(1-4):299–305, 1998.

[9] Kant, Karunesh, Shukla, A, and Sharma, Atul. Performance evaluation of fatty acids as phase change material for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 6:153–162, 2016.

[10] Sharma, Atul, Shukla, A, Chen, CR, and Dwivedi, S. Development of phase change materials for building applications. *Energy and Buildings*, 64:403–407, 2013.

[11] Sharma, Atul, Tyagi, V Veer, Chen, CR, and Buddhi, Dharam. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2):318–345, 2009.

[12] Tyagi, Vineet Veer and Buddhi, D. Pcm thermal storage in buildings: a state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6):1146–1166, 2007.

[13] Bal, Lalit M, Satya, Santosh, Naik, SN, and Meda, Venkatesh. Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1):876–880, 2011.

[14] Bal, Lalit M, Satya, Santosh, and Naik, SN. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8):2298–2314, 2010.

[15] Kant, Karunesh, Shukla, Amritanshu, Sharma, Atul, and Biwole, Pascal Henry. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy*, 140:151–161, 2016.

[16] Kant, Karunesh, Shukla, A, Sharma, Atul, Kumar, Anil, and Jain, Anand. Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative food science & emerging technologies*, 34:86–99, 2016.

[17] Shukla, A, Kant, Karunesh, Sharma, Atul, and Biwole, Pascal Henry. Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160:275–286, 2017.

[18] Huang, MJ, Eames, PC, and Norton, Brian. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 80(9):1121–1130, 2006.

[19] Radhwan, Abdulhaiy M. Transient performance of a stepped solar still withbuilt-in latent heat thermal energy storage. *Desalination*, 171(1):61–76, 2005.

[20] El-Sebaii, AA, Al-Ghamdi, AA, Al-Hazmi, FS, and Faidah, Adel S. Thermal performance of a single basin solar still with pcm as a storage medium. *Applied Energy*, 86(7-8):1187–1195, 2009.

[21] Tabrizi, Farshad Farshchi, Dashtban, Mohammad, and Moghaddam, Hamid. Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system. *Desalination*, 260(1-3):248–253, 2010.

[22] Dashtban, Mohammad and Tabrizi, Farshad Farshchi. Thermal analysis of a weir-type cascade solar still integrated with pcm storage. *Desalination*, 279(1-3):415–422, 2011.

[23] Al-Hamadani, AAF and Shukla, SK. Water distillation using solar energy system with lauric acid as storage medium. *international Journal of energy engineering*, 1(1):1–8, 2011.

[24] Kantesh, DC. Design of solar still using phase changing material as a storage medium. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 3(12):1–6, 2012.

[25] Sathyamurthy, Ravishankar, Nagarajan, PK, Kennady, Hyacinth, Ravikumar, TS, Paulson, V, and Ahsan, Amimul. Enhancing the heat transfer of triangular pyramid solar still using phase change material as storage material. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 5(1), 2014.

[26] Chander, MS and Gowtham, M. Concentrated parabolic solar distiller integrated with latent heat storage material and mini solar pond. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2(3):2–7, 2011.

[27] Arunkumar, Thirugnanasambantham, Denkenberger, D, Ahsan, Amimul, and Jayaprakash, R. The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material. *Desalination*, 314:189–192, 2013.

[28] Kabeel, AE, Abdelgaied, Mohamed, and Mahgoub, M. The performance of a modified solar still using hot air injection and pcm. *Desalination*, 379:102–107, 2016.