مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، زمستان ۱۳۹۶، دوره ۸، شماره ٤، ص ص ۲۰-۳۰

فصلنامه

مهندسی مکانیک و ارتعاشات

jvibme.semnaniau.ac.ir

مروری بر تحقیقات صورت گرفته بر روی تاثیر استفاده از مواد متخلخل و نانوذرات در بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن های خورشیدی

علی خوش‌آهنگ[۱]، نادر رهبر[۲*]

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران

* سمنان، 35196-97951، nrahbar@gmail.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۶ مهر ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۱ آذر ۱۳۹۶

ارائه در سایت: ۲۰ دی ۱۳۹۶

کلیدواژگان

آب‌شیرین‌کن خورشیدی

تکنیک‌های غیرفعال

مواد متخلخل

نانوذرات

بازدهی

چکیده

بحران کمبود آب شرب، به یکی از چالش‌های اصلی جوامع بشری در سال‌های اخیر تبدیل شده است. اکثر منابع آبی موجود در کره زمین یا به‌صورت آب شور غیر قابل شرب و یا به صورت یخچال در قطب‌ها ذخیره شده‌اند. بنابراین از آن‌ها نمی‌توان به‌صورت مستقیم جهت آشامیدن استفاده نمود. این موضوع، اهمیت استفاده از تکنیک‌های مناسب جهت شیرین‌سازی آب را نشان می‌دهد. یکی از این تکنیک‌ها، استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است که از آن در نواحی گرمسیری دور افتاده می‌توان بهره جست. ساختار ساده، هزینه ساخت پایین و استفاده از انرژی خورشید به عنوان منبع پاک و در دسترس از جمله مزایای این گونه وسایل می‌باشند. مشکلی اصلی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، پایین بودن راندمان می‌باشد. محققین در این زمینه روش‌های فعال و غیر فعال زیادی را برای افزایش راندمان آن‌ها به‌کار بردند. در این پژوهش، تحقیقات روی دو روش غیرفعال به‌کارگرفته شده برای افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن شامل استفاده از مواد متخلخل و نانوذرات مرور می شوند.

A literature review on the effect of using porous materials and Nanoparticles on improving of the performance of solar stills

Ali Khosh-Ahang[1], Nader Rahbar[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran

* P.O.B. 35196-97951, Semnan, Iran, nrahbar@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Received 28 September 2017

Accepted 2 December 2017

Available Online 1 January 2018

Keywords

Solar still

Passive techniques

Porous material

Nanoparticles

Efficiency

ABSTRACT

Drinking water scarcity has become one of the main challenges of human societies in recent years. Most of the water resources are stored as the non-drinkable saline water or are frozen in the poles. Therefore, they cannot be used directly for drinking. This issue indicates the importance of using appropriate techniques for water purification. One of these techniques is the usage of solar stills that can be used in remote tropical areas. The simple structure, low cost of manufacturing, and the usage of solar energy as a clean source is some benefits of this kind of equipment. The main problem of solar stills is their low efficiency. The researchers in this field used many active and passive methods to increase the efficiency of this device. In this research, two passive techniques used for enhancing the efficiency of solar stills containing usage of porous materials and nanoparticles are reviewed.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ali Khosh-Ahang, Nader Rahbar, A literature review on the effect of using porous materials and Nanoparticles on improving of the performance of solar stills, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 4, pp. 20-30, 2018 (In Persian)

۱- مقدمه

حجم آب‌های موجود در کره زمین در حدود ۱/۴ میلیارد کیلومتر مکعب است که ۷۵ درصد از سطح زمین را در برگرفته‌اند، امّا بیشتر آب موجود در زمین آب شور است. دریاها ۹۷ درصد از آب قابل‌دسترس در زمین هستند. ۰/۵ درصد از آب‌ها در لایه بالایی یا اتمسفر (ابرها) وجود دارند. منابع آب شیرین در زمین تنها ۳۵ میلیون کیلومتر مکعب است [۱] (تقریباً ۲/۵ درصد کل حجم آب‌های زمین)، که از این مقدار ۶۸/۹ درصد آب‌های شیرین (در حدود ۲۴ میلیون کیلومتر مکعب) به‌صورت برف و یخ در کوهستان‌ها و دو قطب شمالی و جنوبی زمین ذخیره شده‌اند که به‌سختی برای مصرف بشر قابل دسترسی‌اند. همچنین قسمت عمده منابع باقیمانده آب شیرین، ۱۰/۸ میلیون کیلومتر مکعب (۳۰/۸ درصد منابع آب شیرین) جزء منابع آب زیرزمینی به شمار می‌روند. درنتیجه کل ذخیره آب قابل‌دسترسی برای بشر چیزی بیشتر از ۲۰۰ هزار کیلومتر مکعب نیست، که مصرف بیش‌ازحد همین میزان آب نیز باعث برهم خوردن بوم‌سازگان عمومی زمین می‌شود. پس تنها حدود ۰/۰۱۴ درصد از منابع آب کره زمین برای مصرف قابل‌دسترس است. اگر نخواهیم منابع تجدید نشدنی را به خطر بیندازیم درواقع مقدار آب قابل استفاده چیزی بین ۱۲/۵ هزار تا ۱۴ هزار کیلومتر مکعب است. جهان عرب، شمال آفریقا و منطقه خاورمیانه تنها به ۰/۶۷ درصد از منابع آب شیرین تجدید شدنی کره زمین دسترسی دارند که به‌زحمت نزدیک به هزار متر مکعب برای هر نفر می‌رسد [۲].

آمار، وضعیت منابع آب جهان را بسیار مخاطره‌آمیز نشان می‌دهد؛ بنابراین توسعه توجهات و احترام به ارزش آب و محیط‌زیست از اهمیت نهادینه‌تری برخوردار است. برای دهه‌های زیادی، بشر غیرمسئولانه از محیط‌زیست بهره برده و بیش از نیاز منابع را استفاده کرده و در راستای تخریب و کاهش کیفیت منابع آب گام برداشته است. کاهش و کمبود تولیدات کشاورزی از عواقب سوء بحران آب است. به‌همین دلیل حل این بحران بدون مداخله انسان و اجرای برنامه‌های بلندمدت ممکن نبوده و تأخیر در انجام وظایف، هزینه‌های اقتصادی طرح‌های عمرانی را افزایش داده و باعث افزایش مخاطرات حیات انسان‌ها می‌گردد. با توجه به حجم بالای آب‌های شور، باید به دنبال روش‌های مناسب جهت شیرین نمودن آب‌های شور بود. روش متداولی که برای تأمین آب شرب به‌کار گرفته می‌شود استفاده از دستگاه‌های معمول آب‌شیرین‌کن، ازجمله اسمز معکوس[1]، تقطیر، الکترودیالیز و غیره است. در این‌گونه سازوکارها هزینه بالای ساخت، تعمیر و نگهداری و از همه مهم‌تر نیاز به مصرف برق ازجمله معایب به شمار می‌روند. همچنین ظرفیت بالا و عدم کاربری آن برای مناطق با جمعیت محدود باعث می‌شود که استفاده ازاین‌گونه سازوکارها در روستاها امری غیرممکن باشد [۳].

آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به‌عنوان روشی برای برطرف نمودن معایب اشاره شده و فراگیر نمودن استفاده از وسایل تصفیه آب پیشنهاد گردیده است. ازجمله مزایای استفاده از انرژی خورشیدی در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌توان به امن و بی‌خطر بودن، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، رایگان و در دسترس بودن انرژی خورشیدی اشاره نمود. همچنین، ساختار ساده، هزینه ساخت پایین و مناسب بودن جهت استفاده در نواحی دوردست از جمله مزایای این گونه وسایل می‌باشند. مشکل اساسی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، پایین بودن راندمان این‌گونه وسایل می‌باشد. لذا به‌کارگیری روش‌هایی جهت افزایش راندمان آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. در قسمت بعدی، تاریخچه‌ای از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بیان می‌شود.

۲- تاریخچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی

آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌عنوان یک فنّاوری خورشیدی دارای قدمت طولانی می‌باشد و استفاده از آن به ۲۰۰۰ سال پیش بازمی‌گردد که در ابتدا هدف اصلی تولید نمک بود. اولین استفاده مستند از تقطیر خورشیدی برای تولید آب شیرین به قرن شانزدهم میلادی بازمی‌گردد که این روش توسط یک شیمی‌دان عرب در سال ۱۵۵۱ استفاده شد. وی از تعدادی ظروف شیشه‌ای برای تقطیر آب استفاده نمود. دلا[2] در سال ۱۵۸۹ آزمایشی را با استفاده از دو ظرف سفالی انجام داد که در آن ظرف اول با آب شور پر می‌شد و در معرض تابش شدید نور خورشید قرار می‌گرفت و آب تقطیرشده در ظرف دوم جمع می‌شد. لاوازیه[3] شیمی‌دان فرانسوی در سال ۱۸۶۲ با استفاده از دو عدسی بزرگ شیشه‌ای و متمرکز کردن نور خورشید روی ظرف حاوی آب املاح دار، آب مقطر تهیه کرد. کارلوس ویلسون[4] مهندس سوئدی اولین کسی بود که در سال ۱۸۷۲ دستگاه تقطیر خورشیدی را طراحی کرد. در مخزن این دستگاه هرروز

[1] Reverse osmosis
[2] Della
[3] Lavoisier
[4] Carlos Wilson

آب املاح دار ریخته می‌شد که آب در اثر جذب تابش خورشید تبخیر شده و روی جداره داخلی پوشش شیشه‌ای چگالش می‌یافت که درنتیجه این عمل، آب مقطر به‌دست می‌آمد. این دستگاه به مدت بیش از ۵۰ سال کار کرد و روزانه ۴ لیتر بر مترمربع آب از آن خارج می‌شد که هنوز با دستگاه‌های امروزی قابل مقایسه و رقابت است. از این فنّاوری در مقیاس بزرگ‌تر جهت تأمین آب آشامیدنی معدن‌کاران در شیلی استفاده شد. بیشتر دستگاه‌های ساخته شده و مطالعه شده، براساس یک اصل ساخته شده بودند و بیشتر تغییرات به‌طور کلی روی هندسه دستگاه، مواد و روش‌های ساخت صورت گرفته بود. از سال ۱۹۵۸ استفاده از انرژی خورشیدی در تهیه آب شیرین در مرکز تقطیر خورشیدی واقع در فلوریدا، آغاز شد و تا سال تا ۱۹۶۵ چند نوع مختلف دستگاه خورشیدی مطالعه شد.

نتیجه حاصل از این تحقیقات نشان داد که آب تولیدشده، هزینه‌های جانبی و ساخت دستگاه را جبران نمی‌کند و ازآن‌پس مطالعات روی برآورد اقتصادی دستگاه‌ها انجام شد و مرحله بعدی تلاش در جهت بالا بردن بازده عملیاتی این دستگاه‌ها بود. به‌این منظور تحقیقات زیادی درزمینه بالا بردن میزان آب بخار شده و چگالش یافته به‌وسیله گردش هوا در دستگاه تقطیر انجام شد. افزایش راندمان در این تحقیقات با استفاده از گرمایش مجدد آب شور انجام شد. در سال‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ به‌ترتیب در استرالیا و یونان پایگاه‌هایی بر این اساس ساخته شد. در سال ۱۹۹۵ طرح عملی تقطیرکننده‌های خورشیدی نوع تک حوضچه‌ای یا پلکانی و همچنین نوع فتیله‌ای توسط تلکس[1] بررسی شد.

پس‌ازاین تلاش‌های زیادی برای درک چگونگی تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد دستگاه و بهبود آن صورت گرفت، زیرا ملاحظات اقتصادی نشان‌دهنده آن بود که هزینه‌های تولید بالا است و بنابراین راندمان دستگاه باید افزایش پیدا کند. تحقیقات بر روی انرژی خورشیدی در بسیاری از کشورها ازجمله آمریکا، شوروی، استرالیا، هند، پاکستان، ژاپن، ایتالیا، شیلی، کنیا، فرانسه، ایران، مصر، یونان، اتیوپی، تونس، آفریقای جنوبی، الجزایر، اسپانیا، امارات متحده عربی، سودان و عربستان سعودی ادامه دارد. موضوع تقطیر خورشیدی بسیار وسیع است و مقالات زیادی درباره اصول طراحی، مدل‌سازی ریاضی، مشخصات اجرا و اقتصادی بودن دستگاه تقطیر نوشته شده‌است. آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی عموماً دستگاه‌هایی با راندمان پایین می‌باشند. در مواردی که انرژی ارزان به‌سهولت در دسترس باشد و یا میزان آب شیرین مورد نیاز بالا باشد، از روش‌های دیگر استفاده می‌شود؛ اما در مواردی که میزان آب شیرین مورد نیاز کم بوده و دسترسی به انرژی‌های ارزان که عمدتاً سوخت‌های فسیلی هستند به‌سهولت امکان‌پذیر نباشد، با توجه به رایگان بودن انرژی مصرفی، تقطیر خورشیدی روش مناسبی خواهد بود. نکته قابل‌توجه در این میان نیاز به سرمایه اولیه زیاد برای ساخت این دستگاه‌ها می‌باشد، بنابراین اکثر تلاش‌ها در شکل‌گیری گونه‌های جدید آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در جهت افزایش راندمان دستگاه معطوف شده‌است. در بخش بعدی دو روش به‌کارگرفته شده جهت افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شامل استفاده از مواد متخلخل و نانوذرات مرور می‌شوند.

۳- روش‌های به‌کارگرفته شده جهت افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی

روش‌های فعال و غیر فعال زیادی جهت افزایش راندمان آب-شیرین‌کن‌های خورشیدی به‌کارگرفته شده‌اند. در روش‌های فعال، به یک منبع انرژی خارجی جهت افزایش راندمان نیاز است. این منبع ممکن است متمرکز کننده خورشیدی یا یک گرم‌کن جهت افزایش دمای آب‌شور باشد یا می‌تواند یک ترموالکتریک جهت کاهش دمای شیشه جهت چگالش بهتر باشد. در مقابل روش‌های فعال، روش‌های غیرفعال روش‌هایی هستند که برای افزایش راندمان احتیاج به منبع انرژی خارجی ندارند و تنها با تغییر ساختار که می‌تواند تغییر هندسه باشد یا افزودن بخش‌های جدید به سیستم، راندمان وسیله را افزایش می‌دهند. روش‌های غیرفعال معمولاً دارای پیچیدگی و هزینه اجرای کمتری نسبت به روش‌های فعال می‌باشند. در این بخش، تحقیقات روی دو روش غیرفعال به‌کارگرفته شده برای افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی شامل استفاده از مواد متخلخل و نانوذرات مرور می شوند.

۳-۱- کاربرد مواد متخلخل درون آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی

اخیراً، مواد متخلخل در سامانه‌های مختلف انرژی خورشیدی که در آن انتقال حرارت به کمک همرفت و تابش به‌طور هم‌زمان از اهمیت خاصی برخوردارند استفاده شده‌است.

رشیدی و همکاران [۴] مقالات منتشرشده در مورد کاربرد مواد متخلخل برای افزایش راندمان انواع سامانه‌های خورشیدی را مرور کردند. سامانه‌های خورشیدی بررسی‌شده در این مقاله

[1] Telex

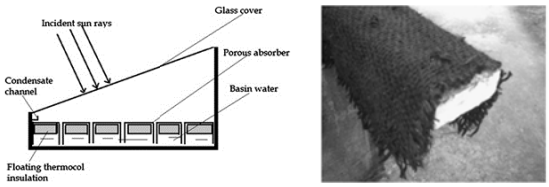
شامل دودکش خورشیدی، مبدل حرارت خورشیدی، گرم‌کن خورشیدی، آب‌شیرین‌کن خورشیدی، جذب‌کننده خورشیدی، استخر خورشیدی و سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی حرارتی به کار گرفته‌شده در یک سامانه خورشیدی بودند. آن‌ها گزارش کردند که خواص جذب تابش خورشید مواد متخلخل باید به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در سامانه‌های خورشیدی در نظر گرفته شوند. برخی از پوشش‌های نوری[1] وجود دارند که از آن‌ها می‌توان به‌منظور بهبود خواص جذبی مواد متخلخل در سامانه‌های خورشیدی بهره جست. بوند و همکاران [۵] تأثیر مواد متخلخل با هدایت حرارتی بالا بر انتقال حرارت از یک مبدل حرارت خورشیدی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با قرار دادن لایه متخلخل درون مبدل حرارت خورشیدی، انتقال حرارت در آن افزایش می‌یابد که بیشینه این افزایش حدود ۵/۹ برابر حالت ساده (بدون استفاده از مواد متخلخل) می‌باشد. در تحقیق دیگری رشیدی و همکاران [۶] یک بررسی حساسیت[2] برای این مسئله انجام دادند تا میزان حساسیت خروجی‌های مسئله شامل عدد ناسلت و افت فشار را نسبت به متغیرهای مختلف شامل عدد دارسی، ضخامت لایه متخلخل و عدد رینولدز تعیین نمایند. آن‌ها دریافتند که نسبت به دیگر متغیرها در ضخامت‌های بالای لایه متخلخل، عدد ناسلت به عدد دارسی بیشتر حساس است. اخیراً رشیدی و همکاران [۷] تولید آنتروپی را برای مسئله فوق محاسبه نمودند. آن‌ها دریافتند که تولید آنتروپی با کاهش عدد دارسی لایه متخلخل افزایش می‌یابد.

برخی محققین از مواد متخلخل درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده کردند. مهمترین دلیل استفاده از مواد متخلخل درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی این است که این مواد به‌دلیل داشتن نسبت سطح مؤثر به حجم بزرگ، نرخ تبخیر را درون آب‌شیرین‌کن افزایش می‌دهد. همچنین این مواد دارای سطح جذب تابش خورشید را در آب‌شیرین‌کن خورشیدی افزایش می‌دهند. در این قسمت به‌اختصار، آخرین پژوهش‌های انجام‌شده درزمینه استفاده از مواد متخلخل درون آب‌شیرین‌کن-های خورشیدی ارائه می‌گردند.

مدنی و زکی [۸] از ذرات دوده (پودر کربن با ذرات ۴۰ تا ۵۰ میکرومتری) که به‌عنوان یک جاذب خورشیدی سیاه متخلخل عمل می‌کردند، در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده کردند. حوضچه آب‌شیرین‌کن از دوده با ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر پر شده‌بود. دوده ابتدا در سطح آب شناور بوده و سپس ته‌نشین می‌گردد. ارتفاع دوده نیز پس از ته‌نشینی و هواگیری اندازه گرفته شد. آن‌ها از دوده به این دلیل استفاده نمودند تا عایق‌کاری حرارتی را از آب‌شیرین‌کن حذف کنند و از این طریق هزینه ساخت آب‌شیرین‌کن را کاهش دهند. دوده استفاده‌شده بدون هزینه از احتراق فرآورده‌های نفتی در نیروگاه فراهم می‌شد. آن‌ها یک بررسی اقتصادی نیز برای برآورد کاهش هزینه‌ها انجام دادند. آن‌ها دریافتند که باوجود کاهش قابل‌توجه هزینه‌های ناشی از حذف عایق حرارتی و استفاده از دوده، کاهش بازده ۱۳ تا ۱۷ درصدی ناشی از این عمل وجود دارد که البته بخشی از این کاهش، توسط دوده جبران شده‌است. در تحقیقی، کابیل [۲] با استفاده از الیاف پارچه‌ای در سطح مقعری شکل مخزن ورودی توانست میزان تبخیر را تا حدودی افزایش دهد. در طرح آزمایشی وی با بهره‌گیری از سطح هرمی شکل در قسمت فوقانی به‌عنوان سیستم چگالنده دستگاه، آب خروجی به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. استفاده از فتیله کنفی (الیاف پارچه‌ای) موجب افزایش میزان جذب تابش خورشید و میزان تبخیر شد. این افزایش به دلیل تأثیر رطوبت موئینگی می‌باشد. نافی[3] و همکاران [۹] قطعات لاستیک و شن را درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌منظور افزایش بهره‌وری قرار دادند. آن‌ها دریافتند که بهره‌وری روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با افزایش ضخامت لاستیک و اندازه ذرات ماسه افزایش می‌یابد. ابوحیجله و ربابا[4] [۱۰] در یک کار تجربی درون مخزن آب شور یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه مکعب‌های اسفنجی قرار دادند. آن‌ها افزایش تولید آب شیرین از ۱۸ تا ۲۷۳ درصدی را برای آب‌شیرین‌کن اصلاح شده در مقایسه با یک آب-شیرین‌کن خورشیدی معمولی در همان شرایط مشاهده کردند. این افزایش تابع پارامترهای مختلف نظیر اندازه مکعب اسفنجی، درصد حجم اسفنج، عمق آب، شوری آب و غیره بود. عبدالله[5] و همکاران [۱۱] تأثیرات مواد جاذب مختلف بر راندمان حرارتی آب‌شیرین‌کن خورشیدی را بررسی کردند. مواد جاذب مورد بررسی شامل اسفنج های فلزی شفاف پوشش داده شده و پوشش داده نشده و سنگ های آتشفشانی سیاه و سفید بودند. آن‌ها افزایش تولید آب مقطر به‌ترتیب ۲۸، ۴۳ و ۶۰ درصدی را برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده با اسفنج‌های فلزی پوشش داده شده و بدون پوشش و سنگ‌های سیاه در مقایسه با

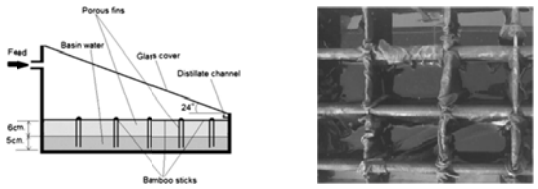
[1] Optical coatings
[2] Sensitivity analysis
[3] Nafey
[4] Abu-Hijleh and Rababa'h
[5] Abdallah

آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی گزارش کردند. سیرواستاوا[1] و آگراوال[2] [۱۲] بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی روی یک آب-شیرین‌کن شیب‌دار یک‌طرفه شامل جاذب‌های حرارتی متخلخل با اینرسی حرارتی پایین به‌صورت شناور درون تشتک، انجام دادند. جاذب متخلخل از پارچه کنفی سیاه ساخته شده‌بود. نمای کلی این آب‌شیرین‌کن به همراه ماده متخلخل استفاده‌شده در آن در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.



شکل ۱ نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش‌شده توسط سیرواستاوا و آگراوال و ماده متخلخل استفاده‌شده در آن [۱۲]

با توجه به اینرسی حرارتی کم جاذب متخلخل، آن‌ها به دمای کاری بالاتری دست یافتند که نهایتاً منجر به افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن شد. ۶۸ و ۳۵ درصد به راندمان آب-شیرین‌کن به ترتیب در روزهای کاملاً صاف و تا حدودی صاف با این تغییر اضافه شدند. در یک کار آزمایشگاهی دیگر، سیرواستاوا و آگراوال [۱۳] از پرّه‌های متخلخل در آب‌شیرین‌کن شیب‌دار یک‌طرفه استفاده کردند. پرّه‌های متخلخل از جنس پنبه و به رنگ سیاه ساخته شدند که داخل حوضچه آب‌شیرین‌کن شناور بودند. همچنین قسمتی از آن‌ها تا بالای سطح آب حوضچه بسط یافته بودند. تصاویری از آب‌شیرین‌کن آزمایش‌شده و پرّه‌های متخلخل استفاده‌شده در شکل ۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۲ نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش‌شده و پرّه‌های متخلخل استفاده‌شده توسط سیرواستاوا و آگراوال [۱۳]

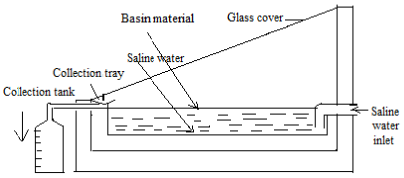
آن‌ها مثل پژوهش قبل نتیجه گرفتند که با قرار دادن این پرّه‌ها داخل آب‌شیرین‌کن، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها بیان کردند که این روش یک راه ساده و اقتصادی برای افزایش راندمان این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها می باشد. همچنین این روش می‌تواند به‌صورت مؤثر در آب‌شیرین‌کن‌ها با حوضچه-های عمیق نیز استفاده شود.

مالاییاپان[3] و الوملی[4] [۱۴] از مواد متخلخل درون یک آب شیرین‌کن شیب‌دار یک‌طرفه استفاده کردند. آن‌ها از سه نوع ماده متخلخل برای این کار استفاده کردند. این سه نوع ماده متخلخل شامل تکه‌های سنگ‌ریزه، تکه‌های گرانیت سیاه و گرانیت سیاه به‌صورت تخته‌سنگ بود که در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

گرانیت سیاه به‌صورت تخته‌سنگ | تکه‌های گرانیت سیاه | تکه‌های سنگ‌ریزه

شکل ۳ مواد متخلخل استفاده‌شده توسط مالاییاپان و الوملی [۱۴]

نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش‌شده توسط آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌است. آن‌ها زاویه شیب سیزده درجه‌ای را برای پوشش شیشه‌ای انتخاب کردند.



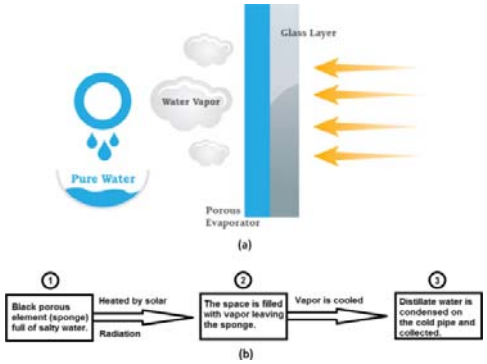
شکل ۴ نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش‌شده توسط مالاییاپان و الوملی [۱۴]

همچنین آن‌ها نتایج خود را با آب‌شیرین‌کن معمولی بدون استفاده از مواد متخلخل مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در میان همه مواد متخلخل درنظر گرفته‌شده در این تحقیق، آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده با گرانیت سیاه به‌صورت تخته‌سنگ بیشترین بازده را در میان آب‌شیرین‌کن‌های اصلاح‌شده با مواد متخلخل و آب‌شیرین‌کن معمولی بدون ماده متخلخل دارد. همچنین آن‌ها افزایش بازده را با اضافه کردن هر سه نوع ماده متخلخل درون آب‌شیرین‌کن نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی مشاهده کردند.

النمیر[5] و دهدولان[6] [۱۵] یک مدل ریاضی برای آب‌شیرین-کن لوله‌ای پرشده از تبخیرکننده متخلخل (اسفنج) و چگالنده

[1] Srivastava
[2] Agrawal
[3] Malaiyappan
[4] Elumalai
[5] Al-Nimr
[6] Dahdolan

داخلی ارائه کردند. سازوکار این آب‌شیرین‌کن در شکل ۵ نمایش داده شده‌است.



شکل ۵ آب‌شیرین‌کن ارائه‌شده توسط النمیر و دهدولان [۵]

سازوکار این طرح به این صورت است که آب درون اسفنج توسط خورشید به‌طور مستقیم گرم شده و تبخیر می‌گردد. سپس بخار آب خنک و توسط چگالنده چگالیده شده و سرانجام در مخزن جمع‌آوری ذخیره می‌شود. لازم به توضیح است که آب در سراسر اسفنج به دلیل خاصیت مویینگی پخش می‌گردد. در این کار نویسندگان مقایسه‌ای بین آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده و معمولی نداشتند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با کاهش سرعت باد و دمای چگالنده، راندمان آب‌شیرین‌کن افزایش می‌یابد.

سلامی[1] و همکاران [۱۶] کارایی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه را با پوشاندن لایه جاذب با لایه‌هایی از اسفنج افزایش دادند. آن‌ها اسفنج را به‌عنوان یک ماده متخلخل ارزان و در دسترس معرفی کردند. آن‌ها با این ابتکار به یک سیستم تقطیر کارآمدتر و زمان‌های تقطیر طولانی‌تری دست یافتند. پانچال و ساتیامورسی[2] [۱۷] به‌صورت تجربی تأثیرات استفاده از پره‌های متخلخل در مخزن آب شور یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه بر کارایی آن را بررسی کردند. پره‌ها در آب‌شیرین‌کن خورشیدی جهت کاهش زمان پیش گرمایش آب در ساعت صبح جهت افزایش خروجی به‌کار می‌روند. نتایج آن‌ها نشان داد که خروجی آب‌شیرین‌کن با استفاده از پره‌ها ۳/۸ لیتر بوده درحالی‌که خروجی آب‌شیرین‌کن معمولی ۲/۶۷ لیتر است. بنابراین، خروجی دستگاه به‌میزان ۴۲/۳ درصد با استفاده از پره‌های متخلخل افزایش می‌یابد. اخیراً، رشیدی و همکاران [۱۸] به صورت تجربی درون یک در آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک‌طرفه از اسفنج مشبک مشکی رنگ استفاده کردند. آن‌ها در مورد دلایل انتخاب این ماده به موارد زیر اشاره نمودند:

الف- این ماده به دلیل داشتن نسبت سطح مؤثر به حجم بزرگ، نرخ تبخیر را درون آب‌شیرین‌کن افزایش می‌دهد.

ب- به‌دلیل ظرفیت حرارتی پایین این ماده، بیشتر گرمای ورودی صرف افزایش دمای آب و تبخیر آن می‌گردد.

ج- این ماده دارای خاصیت فتیله‌ای بوده و آب را به سطح خود جهت تبخیر منتقل می‌کند.

رنگ اسفنج برای آزمایش مشکی انتخاب شده تا حداکثر تابش خورشید را جذب کند. آن‌ها دریافتند که آب‌شیرین‌کن‌های ساده و اصلاح‌شده با اسفنج متخلخل به‌ترتیب به‌میزان ۳۲۶۳ و ۳۸۲۹ سی‌سی بر متر مربع از مساحت مخزن آب شور، آب مقطر تولید می‌کنند که این نشان می‌دهد که آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده با ماده متخلخل حدود ۱۷/۳۵ درصد آب مقطر بیشتری نسبت به آب‌شیرین‌کن ساده در طول یک روز و در شرایطی مشابه تولید می‌کند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که در ساعت پایانی آزمایش، آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده با ماده متخلخل دارای تولید آب مقطر کمتری نسبت به آب‌شیرین‌کن ساده می‌باشد. دلیل این امر این است که در طول آزمایش با تبخیر شدن آب، عمق آب شور موجود در مخزن کاهش می‌یابد که این خود موجب کاهش خاصیت مویینگی ماده متخلخل و کاهش راندمان دستگاه می‌شود. آن‌ها همچنین یک آنالیز اقتصادی برای آزمایش خود ترتیب دادند و مشاهده کردند که قیمت آب تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده با ماده متخلخل نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی پایین‌تر است. این نشان می‌دهد که مواد متخلخل با وجود هزینه بالاتر، با افزایش آب تولیدی هزینه تمام شده برای تولید آب را کاهش می‌دهند و در واقع هزینه تحمیلی خود را به‌خوبی جبران می‌کنند.

جدول ۱ خلاصه تحقیقات انجام شده در مورد به‌کارگیری مواد متخلخل در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.

[1] Sellami
[2] Panchal and Sathyamurthi

جدول ۱ خلاصه تحقیقات انجام شده روی به‌کارگیری مواد متخلخل در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی

نام نویسنده	نوع تحقیق	نوع ماده متخلخل مورد استفاده
مدنی و زکی [۸]	تجربی	ذرات دوده (پودر کربن با ذرات ۴۰ تا ۵۰ میکرومتری)
کابیل [۲]	تجربی	الیاف پارچه‌ای
نافی و همکاران [۹]	تجربی	قطعات لاستیک و شن
ابوحیجله و ربابا [۱۰]	تجربی	مکعب‌های اسفنجی
عبدالله و همکاران [۱۱]	تجربی	اسفنج های فلزی شفاف پوشش داده شده و پوشش داده نشده و سنگ های آتشفشانی سیاه و سفید
سیرواستاوا و آگراوال [۱۲]	تجربی	جاذب‌های حرارتی متخلخل با اینرسی حرارتی پایین
سیرواستاوا و آگراوال [۱۳]	تجربی	پرّه‌های متخلخل از جنس پنبه و به رنگ سیاه
مالاییاپان و الوملی [۱۴]	تجربی	تکه‌های سنگ‌ریزه، تکه های گرانیت سیاه و گرانیت سیاه به‌صورت تخته‌سنگ
النمیر و دهدولان [۱۵]	تحلیلی	اسفنج
سلامی و همکاران [۱۶]	تجربی	پوشاندن لایه جاذب با لایه‌هایی از اسفنج
پانچال و ساتیامورسی [۱۷]	تجربی	پره‌های متخلخل از جنس آلومینیوم
رشیدی و همکاران [۱۸]	تجربی	اسفنج

۲-۳-کاربرد نانو ذرات درون آب شیرین کن های خورشیدی

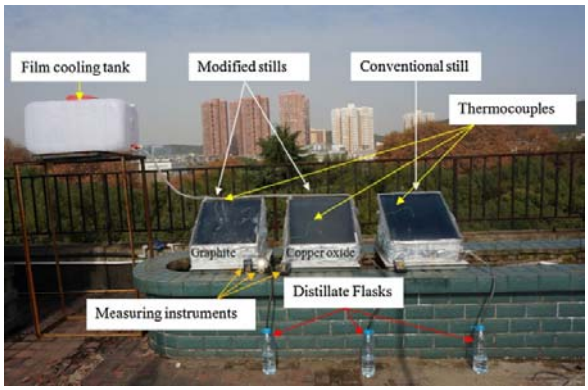
جابجایی همرفت طبیعی به‌عنوان دلیل اصلی کارکرد آب‌شیرین-کن‌های خورشیدی، توسط نیروی شناوری بوجود می آید. این نیروی شناوری به‌دلیل اختلاف دما بین آب و پوشش شیشه‌ای ایجاد می‌شود. نیروی شناوری با افزایش این اختلاف دما افزایش می یابد. نانوسیالات معمولا دارای ظرفیت حرارتی کمتری نسبت به آب خالص (بدون نانوذرات) می‌باشند. این بدان معنی است که نانوسیالات سریع‌تر انرژی حرارتی را جذب نموده و قادر هستند سریع‌تر از آب گرم شوند. بنابراین در شرایط مشابه دمای بالاتری نسبت به آب دارند. این بدان معنی است که اختلاف دمای بیشتری بین آب و پوشش شیشه‌ای با به‌کارگیری نانوذرات در آب‌شیرین‌کن خورشیدی ایجاد می‌شود که این به نوبه خود منجر به افزایش نیروی شناوری و افزایش راندمان در آب‌شیرین-کن خورشیدی می‌گردد. برخی محققین از نانوذرات درون آب-شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده کردند. در این قسمت، آخرین پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه مرور می‌شوند.

کابیل[1] و همکاران [۱۹] از نانوسیال و چگالنده خارجی در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی به‌صورت همزمان استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که راندمان آب‌شیرین‌کن خورشیدی به ترتیب ۱۱۶ و ۵۳/۲ درصد با به‌کارگیری نانوسیال و چگالنده خارجی افزایش می‌یابد. کابیل و همکاران [۲۰] به‌طور همزمان در یک کار آزمایشگاهی برای افزایش بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نانوسیال و خلاء استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده همزمان از این روش‌ها به‌طور قابل توجهی میزان تبخیر و چگالش را افزایش می‌دهد و درنتیجه باعث افزایش بهره‌وری می‌شود. ساهوتا و تیواری[2] [۲۱] تأثیر استفاده از نانوسیال را بر کارایی آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه از دیدگاه قانون اول و دوم ترمودینامیک بررسی کردند. آن‌ها برای نانو سیال در مقایسه با مورد آب خالص، بهره‌وری انرژی حرارتی و اگزرژی حرارتی بالاتری را مشاهده کردند. الانگو[3] و همکاران [۲۲] اثرات استفاده از نانوذرات مختلف شامل Al_2O_3، ZnO، Fe_2O_3 و SnO_2 را بر کارایی آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نانوذره Al_2O_3 بهره‌وری بالاتری به‌میزان ۲۹/۹۵ درصد در مقایسه با مورد آب خالص ایجاد کرده و حداکثر بهره‌وری را در میان تمام نانوذرات به‌کارگرفته شده در این تحقیق دارد. ساهوتا و تیواری [۲۳] تأثیر نانوذرات Al_2O_3 را بر کارایی یک آب-شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه بررسی کردند. آن‌ها با افزودن نانوذرات Al_2O_3 با غلظت ۰/۱۲ درصد به ۳۵ کیلوگرم آب شور، افزایش ۱۲/۲ درصدی در عملکرد آب‌شیرین‌کن ایجاد کردند. ساهوتا و تیواری [۲۴] از نانوذرات Al_2O_3، CuO و TiO_2 در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که غلظت بهینه نانوذرات

[1] Kabeel
[2] Sahota and Tiwari
[3] Elango

بستگی به شرایط آب و هوایی منطقه از جمله دمای محیط و شدت تابش خورشید دارد.

السعید[1] و همکاران [۲۵] یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی حاوی نانوذرات Al_2O_3 را آزمایش کردند. آن‌ها بازدهی این آب-شیرین‌کن خورشیدی را ۴۹/۴ درصد گزارش کردند. شرشیر[2] و همکاران [۲۶] به‌طور همزمان در یک تحقیق تجربی به منظور بهبود بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نانوذرات و خنک-کننده پوشش شیشه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از از اکسید مس و گرافیت به‌عنوان نانوذرات استفاده کردند. آن‌ها بازده ۳۰ درصدی را برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی گزارش کردند. آن‌ها همچنین راندمان‌های ۴۶ و ۴۹ درصدی را برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی زمانی‌که در آن به‌ترتیب از نانوذرات اکسید مس و گرافیت همراه با خنک کننده پوشش شیشه‌ای استفاده شود، ثبت کردند. شکل ۶ نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش شده توسط شرشیر و همکاران [۲۶] به‌همراه خنک‌کننده پوشش شیشه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۶ نمایی از آب‌شیرین‌کن آزمایش شده توسط شرشیر و همکاران [۲۶] به همراه خنک‌کننده پوشش شیشه‌ای

کابیل و همکاران [۲۷] در یک کار تجربی، اثرات استفاده از نانوذرات و چگالنده خارجی را بر راندمان یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی کردند. آن‌ها از اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم به‌عنوان نانوذرات استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بازده روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی اصلاح شده به‌ترتیب ۸۴/۱۶ و ۷۳/۸۵ درصد با استفاده از نانوذرات اکسید منیزیم و اکسید آلومینیوم و فن چگالنده خارجی است. علاوه بر این، آن‌ها بازده روزانه در حدود ۳۴ درصدی را برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی گزارش کردند. ساهوتا و همکاران [۲۸] به-طور تحلیلی اثر نانوذرات مختلف شامل Al_2O_3، CuO و TiO_2 را بر کارایی سیستم‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی فعال بررسی کرد. آن‌ها آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه را با جمع کننده خورشیدی فتوولتائیک[3] و مبدل حرارتی سهموی ترکیب کردند. آن‌ها دریافتند که استفاده از نانوذرات اکسید مس دارای عملکرد بهتری در مقایسه با دو نانوذره دیگر در آب‌شیرین‌کن می‌باشد. در پژوهش دیگری، ساهوتا و همکاران [۲۹] تأثیرات استفاده از نانوذرات Al_2O_3، CuO و TiO_2 را بر روی اگزرژی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با استفاده از نانوذرات، اگزرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی افزایش می‌یابد. ماهیان و همکاران [۳۰] تأثیر نانوذرات بر سرعت تبخیر در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به یک مبدل حرارتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از نانوذرات Cu و SiO_2 استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که در دماهای بالا، استفاده از نانوذرات SiO_2 که دارای هدایت حرارتی پایین‌تر نسبت به نانوذرات Cu می‌باشد، باعث عملکرد بالاتری در آب‌شیرین‌کن خورشیدی می شود. ساهوتا و تیواری [۳۱] آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار دو طرفه هیبریدی را از دیدگاه اقتصادی و محیط زیستی بررسی کردند. تجزیه و تحلیل آنها برای سه مورد شامل آب‌شیرین‌کن هیبریدی بدون استفاده از مبدل حرارتی (مورد الف)، آب‌شیرین‌کن هیبریدی با استفاده از مبدل حرارتی (مورد ب) و آب‌شیرین‌کن معمولی (مورد ج) انجام شد. آن‌ها از نانوذرات Al_2O_3 و CuO استفاده کردند. آن-ها مشاهده کردند که نانوذرات CuO دارای عملکرد سالانه بهتر و شرایط مطلوبتری از دیدگاه اقتصادی و محیط زیستی برای موارد الف و ب است در حالی‌که نانوذرات Al_2O_3 عملکرد بهتری برای مورد ج دارند. چن[4] و همکاران [۳۲] به بررسی پایداری، ویژگی‌های نوری و هدایت حرارتی نانوذرات SiC که در یک سیستم تقطیر خورشیدی مورد استفاده قرار می گیرند، پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت نمک تا حدودی اثرات منفی بر پایداری و هدایت حرارتی نانوسیال مورد استفاده در سیستم تقطیر خورشیدی دارد. رشیدی و همکاران [۳۳] از مدل حجم مایع برای شبیه‌سازی جریان نانوسیال و تولید آنتروپی درون یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه استفاده کردند. از مدل حجم مایع می‌توان برای شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده نمود. این مدل قابلیت در نظر گرفتن

[1] El-Said
[2] Sharshir
[3] Photovoltaic collectors
[4] Chen

جریان‌های چند فازی و مدل کردن تبخیر و چگالش و همچنین ردیابی فصل مشترک بین چند فاز حین تغییر فاز را دارا می‌باشد. آن‌ها دریافتند که بهره‌وری آب‌شیرین‌کن در حدود ۲۵ درصد با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، حداکثر مقادیر تولید آنتروپی‌های اصطکاکی و حرارتی در نواحی اطراف سطوح پایینی و بالایی آب‌شیرین‌کن رخ می‌دهند. هر دو نوع تولید آنتروپی با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابند. تولید آنتروپی‌های اصطکاکی و حرارتی به‌ترتیب به‌میزان ۹۵ و ۲۵ درصد با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد افزایش می یابند.

در تحقیق دیگری، رشیدی و همکاران [۳۴] از مدل حجم مایع برای شبیه‌سازی جریان جابجایی آزاد نانوسیال درون یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که بهره‌وری آب‌شیرین‌کن پلکانی در حدود ۲۲ درصد با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۵ درصد افزایش می یابد.

جدول ۲ خلاصه تحقیقات انجام شده برروی به‌کارگیری نانوذرات در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ خلاصه تحقیقات انجام شده روی به‌کارگیری نانوذرات در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی

نام نویسنده	نوع تحقیق	نوع نانوذره مورد استفاده
کابیل و همکاران [۱۹]	تجربی	Al_2O_3
کابیل و همکاران [۲۰]	تجربی	Cu_2O و Al_2O_3
ساهوتا و تیواری [۲۱]	تحلیلی	TiO_2 و CuO ،Al_2O_3
الانگو و همکاران [۲۲]	تجربی	Al_2O_3 ،ZnO ،Fe_2O_3 و SnO_2
ساهوتا و تیواری [۲۳]	تحلیلی	Al_2O_3
ساهوتا و تیواری [۲۴]	تحلیلی	TiO_2 و CuO ،Al_2O_3
السعید و همکاران [۲۵]	تحلیلی	Al_2O_3
شرشیر و همکاران [۲۶]	تجربی	CuO و گرافیت
کابیل و همکاران [۲۷]	عددی	Cu_2O و Al_2O_3
ساهوتا و همکاران [۲۸]	تحلیلی	TiO_2 و CuO ،Al_2O_3
ساهوتا و همکاران [۲۹]	تحلیلی	TiO_2 و CuO ،Al_2O_3
ماهیان و همکاران [۳۰]	تجربی/ تحلیلی	SiO_2 و Cu
ساهوتا و تیواری [۳۱]	تحلیلی	CuO و Al_2O_3
چن و همکاران [۳۲]	تجربی	SiC
رشیدی و همکاران [۳۳]	عددی	Al_2O_3
رشیدی و همکاران [۳۴]	عددی	Al_2O_3

۴- نتایج

۴-۱- خلاصه نتایج

در این پژوهش، تحقیقات روی دو روش غیرفعال به‌کارگرفته شده برای افزایش راندمان آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی شامل استفاده از مواد متخلخل و نانوذرات مرور شدند. نتایج تحقیقات به‌دست آمده در این زمینه‌ها به‌صورت خلاصه در این قسمت ارائه می‌شوند:

- به‌طور کلی مواد متخلخل به‌دلیل قیمت پایین و در دسترس بودن، کاندیدای مناسبی جهت استفاده در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌باشند.
- اسفنج ماده متخلخل مناسبی برای بهبود راندمان در آب‌شیرین‌کن خورشیدی می‌باشد. ازجمله دلایل انتخاب این ماده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف-این ماده به دلیل داشتن نسبت سطح مؤثر به حجم بزرگ، نرخ تبخیر را درون آب‌شیرین‌کن افزایش می‌دهد.

ب-به‌دلیل ظرفیت حرارتی پایین این ماده، بیشتر گرمای ورودی صرف افزایش دمای آب و تبخیر آن می‌گردد.

ج-این ماده دارای خاصیت فتیله‌ای بوده و آب را به سطح خود جهت تبخیر منتقل می‌کند.

- قیمت آب تولیدی توسط آب‌شیرین‌کن اصلاح‌شده با ماده متخلخل نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی پایین‌تر است. این نشان می‌دهد که مواد متخلخل با وجود هزینه بالاتر، با افزایش آب تولیدی هزینه تمام شده برای تولید آب را کاهش می‌دهند و در واقع هزینه تحمیلی خود را به‌خوبی جبران می‌کنند.
- نانوسیالات معمولا دارای ظرفیت حرارتی کمتری نسبت به آب خالص (بدون نانوذرات) می‌باشند. این بدان معنی است که نانوسیالات سریع‌تر انرژی حرارتی را جذب نموده و قادر هستند سریع‌تر از آب گرم شوند. بنابراین در شرایط مشابه دمای بالاتری نسبت به آب دارند. این بدان معنی است که اختلاف دمای بیشتری بین آب و پوشش شیشه‌ای با به‌کارگیری نانوذرات در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ایجاد می‌شود که این به نوبه خود منجر به افزایش نیروی شناوری و افزایش راندمان در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌گردد.
- با استفاده از نانوذرات، اگزرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی افزایش می‌یابد.

- افزایش غلظت نمک تا حدودی اثرات منفی بر پایداری و هدایت حرارتی نانوسیال مورد استفاده در سیستم تقطیر خورشیدی دارد.
- از مدل حجم مایع می‌توان برای شبیه سازی عددی جریان نانوسیال درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی استفاده نمود. این مدل قابلیت در نظر گرفتن جریان‌های چند فازی و مدل کردن تبخیر و چگالش و همچنین ردیابی فصل مشترک بین چند فاز حین تغییر فاز در آب‌شیرین‌کن خورشیدی را دارا می‌باشد.

۲-۴- پیشنهادات جهت ادامه کار

با انجام این پژوهش، پیشنهادهای زیر جهت ادامه کار مطرح می‌گردند:

- ته‌نشینی نمک موجود در آب درون ماده متخلخل به مرور زمان به‌دلیل بستن خلل و فرج این ماده بر روی عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. لذا ضروری است که این موضوع به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در بلند مدت مورد بررسی قرار گیرد.
- نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد که افت سطح آب شور در طول روز منجر به اثر منفی بر روی آب‌شیرین‌کن اصلاح شده با ماده متخلخل به‌دلیل کاهش خاصیت مویینگی آن می‌شود. برای حل این مشکل، استفاده از شناور درون آب-شیرین‌کن خورشیدی اصلاح‌شده با مواد متخلخل جهت کاهش افت سطح آب و راندمان آب‌شیرین‌کن در ساعات پایانی آزمایش پیشنهاد می‌گردد.
- ترکیب نمودن مواد متخلخل با مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان ابزار جذب گرما به‌منظور افزایش تولید آب در شب پیشنهاد می‌گردد.
- خواص اپتیکی مواد متخلخل باید به‌عنوان یکی از عوامل مهم برای استفاده از این مواد درون آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در نظر گرفته شود. برخی از پوشش‌های اپتیکی به‌منظور بهبود خواص اپتیکی مواد متخلخل وجود دارند که از آن‌ها می‌توان برای جذب بیشتر تابش خورشید بهره جست.
- استفاده از مواد متخلخل دیگر در آب‌شیرین‌کن خورشیدی نظیر پدهای سلولزی، پوشال کولر و غیره به‌منظور افزایش راندمان و مقایسه آن‌ها با یکدیگر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد.
- رسوب و تعلیق نانوذرات[1]، دو عامل مهم و تأثیرگذار بر کارایی سیستم‌های حرارتی می‌باشند. این عوامل هنگام استفاده از نانوذرات مختلف در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی باید مورد توجه قرار گیرند.
- انواع جدیدی از نانوذرات مانند نانوذرات گرافن[2] دارای خواص ترموفیزیکی مناسبی می‌باشند. استفاده از آن‌ها در در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌تواند در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد.
- بررسی پایداری[3] نانوذرات و استفاده از فن‌آوری‌های جدید برای افزایش پایداری آن‌ها به‌منظور استفاده موثر و مطمئن از آن‌ها در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی ضروری به نظر می‌رسد.

۵- مراجع

[1] S. Al-Kharabsheh and D.Y .Goswami, Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat, *Desalination*, Vol. 156, pp. 323-332, 2003.

[2] A.E. Kabeel, Performance of solar still with a concave wick evaporation surface, *Energy*, Vol. 34, pp. 1504-1509, 2009.

[3] V.K. Dwivedi and G.N. Tiwari, Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode, *Desalination*, Vol. 250, pp. 49-55, 2010.

[4] S. Rashidi, J.A. Esfahani and A. Rashidi, A review on the applications of porous materials in solar energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, pp. 1198–1210, 2017.

[5] M. Bovand, S. Rashidi and J.A. Esfahani, Heat transfer enhancement and pressure drop penalty in porous solar heaters: Numerical simulations, *Solar Energy*, Vol. 123, pp. 145–159, 2016.

[6] S. Rashidi, M. Bovand and J.A. Esfahani, Heat transfer enhancement and pressure drop penalty in porous solar heat exchangers: A sensitivity analysis, *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 726–738, 2015.

[7] S. Rashidi, M. Bovand and J.A. Esfahani, Sensitivity analysis for entropy generation in porous solar heat exchangers by RSM, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 31, pp. 390-402, 2017.

[8] A.A. Madani and G.M. Zaki, Yield of Solar stills with porous basins, *Applied Energy*, Vol. 52, pp. 273-281, 1995.

[9] A.S. Nafey, M. Abdelkader, A. Abdelmotalip, A.A. Mabrouk, Solar still productivity enhancement, *Energy Conversion and Management*, Vol. 42, pp. 1401-1408, 2001.

[10] B. A. Abu-Hijleh, H.M.Rababa'h, Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 1411-1418, 2003.

[1] Deposition and suspension

[2] Graphene nanoparticles

[3] Stability

[11] S. Abdallah, M.M.Abu-Khader, O. Badran, Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills, *Desalination*, Vol. 242, pp. 128-137, 2009.
[12] P.K. Srivastava and S.K. Agrawal, Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers, *Desalination*, Vol. 311, pp. 198-205, 2013.
[13] P.K. Srivastava and S.K. Agrawal, Winter and summer performance of single sloped basin type solar still integrated with extended porous fins, *Desalination*, Vol. 319, pp. 73-78, 2013.
[14] P. Malaiyappan and N. Elumalai, Solar still integrated with porous material, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, JCHPS Special Issue 4, pp. 215-217, 2014.
[15] M.A. Al-Nimr and M.E .Dahdolan, Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser, *Solar Energy*, Vol. 114, pp. 8-16, 2015.
[16] M.H. Sellami, T. Belkis, M.L. Aliouar, S.D. Meddour, H. Bouguettaia, K. Loudiyi, Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge, *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 5, pp. 111-117, 2017.
[17] H. Panchal, R. Sathyamurthi, Experimental analysis of single-basin solar still with porous fins, *International Journal of Ambient Energy*, https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1360206, 2017.
[18] S. Rashidi, N. Rahbar, M.S. Valipour, J.A. Esfahani, Enhancement of solar still by reticular porous media: Experimental investigation with exergy and economic analysis, *Applied Thermal Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.089, 2017.
[19] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach, *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 493-498, 2014.
[20] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum, *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 268–274, 2014.
[21] L. Sahota, G.N. Tiwari, Effect of nanofluids on the performance of passive double slope solar still: A comparative study using characteristic curve, *Desalination*, Vol. 388, pp. 9-21, 2016.
[22] T. Elango, A. Kannan, K. K. Murugavel, Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids, *Desalination*, Vol. 360, pp. 45–51, 2015.
[23] L. Sahota, G.N. Tiwari, Effect of Al_2O_3 nanoparticles on the performance of passive double slope solar still, *Solar Energy*, Vol. 130, pp. 260–272, 2016.
[24] L. Sahota, G.N. Tiwari, Effect of Al_2O_3 and TiO_2-water based nanofluids on heat transfer coefficients of passive double slope solar still, *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, Vol. 24, pp. 1-18, 2016.
[25] E.M.S. El-Said, A.E. Kabeel, M. Abdulaziz, Theoretical study on hybrid desalination system coupled with nano-fluid solar heater for arid states, *Desalination*, Vol. 386, pp. 84–98, 2016.
[26] S.W. Sharshir, G. Peng, L. Wu, N. Yang, F.A. Essa, S. I.T. Mohamed, A.E. Kabeel, A.H. Elsheikh, Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: Experimental study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 684–693, 2017.
[27] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 75, pp. 77–86, 2017.
[28] L. Sahota, Shyam, G.N. Tiwari, Analytical characteristic equation of nanofluid loaded active double slope solar still coupled with helically coiled heat exchanger, *Energy Conversion and Management*, Vol. 135, pp. 308–326, 2017.
[29] L. Sahota, Shyam, G.N. Tiwari, Energy matrices, enviroeconomic and exergoeconomic analysis of passive double slope solar still with water based nanofluids, *Desalination*, Vol. 409, pp. 66–79, 2017.
[30] O. Mahian, A. Kianifar, S.Z. Heris, D. Wen, A.Z. Sahin, S. Wongwises, Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger, *Nano Energy*, Vol. 36, pp. 134-155, 2017.
[31] L. Sahota, G.N. Tiwari, Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of hybrid double slope solar still loaded with nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 148, pp. 413-430, 2017.
[32] W. Chen, C. Zou, X. Li, L. Li, Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, pp. 264–270, 2017.
[33] S. Rashidi, S. Akar, M. Bovand, R. Ellahi, Volume of fluid model to simulate the nanofluid flow and entropy generation in a single slope solar still, *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 400–410, 2018.
[34] S. Rashidi, M. Bovand, N. Rahbar, J.A. Esfahani, Steps optimization and productivity enhancement in a nanofluid cascade solar still, *Renewable Energy*, Vol. 118, pp. 536-545, 2018.