



Mathematical Modeling and Performance Evaluation of Flat-Plate Solar Still with Porous and Phase Change Materials from an Energy and Exergy Perspective

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Karimi Birgani K.¹,
Setareh M.^{1*},
Basirat Tabrizi H.²,

How to cite this article

Karimi Birgani K, Setareh M, Basirat Tabrizi H, Mathematical Modeling and Performance Evaluation of Flat-Plate Solar Still with Porous and Phase Change Materials From an Energy and Exergy Perspective. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(03):125-135.

¹ Mechanical Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

² Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

msetare@jsu.ac.ir

Article History

Received: November 27, 2024

Accepted: January 21, 2025

ePublished: May 5, 2025

ABSTRACT

In recent years, the issue of drinking water scarcity has emerged as one of the most critical challenges facing humanity. Consequently, the evaluation of water purification systems' performance has garnered significant interest among researchers. Additionally, given the rise in energy consumption and the excessive reliance on fossil fuels, the adoption of renewable energy sources such as solar energy is becoming increasingly prevalent. This study presents a mathematical modeling of the energy and exergy of a flat-plate solar still system utilizing porous materials and phase change materials. To assess the performance of the system, energy balance equations are formulated for various components, including the glass, brine, absorber plate, and phase change material. These equations are solved using MATLAB software to evaluate the impact of incorporating porous and phase change materials as innovative methods on the efficiency and energy and exergy performance of solar still. Results indicate that the overall energy and exergy efficiencies improve by 15.07% and 1.04%, respectively, in the simultaneous presence of porous and phase change materials compared to the base case. In the case of phase change material alone, the improvements are 11.04% and 0.62%, respectively, compared to the base case. For porous material alone, the improvements are 3.15% and 0.32%, respectively. Furthermore, the production of freshwater increases by 23.72%, 17.88%, and 6.17%, respectively, in the presence of both porous material and phase change material, phase change material alone, and porous material alone, compared to the base case.

Keywords Solar Still, Porous Material, Phase Change Material, Efficiency, Energy, Exergy.

CITATION LINKS

1- Passive and active performance of a multi-side-stepped square pyramid solar still; experimental and 2- A review on PCM and nanofluid for various productivity enhancement methods for double slope solar still: Future challenge and 3- A review on phase change materials in 4- Performance enhancement of single basin solar still using a 5- Improving single-slope passive solar still efficiency through integration of 6- Enhancing the performance of double-slope solar still using nano-enhanced eutectic phase change materials and 7- Enhancing coiled solar still performance with 8- Augmenting thermal performance in tubular solar stills: A multifaceted strategy with 9- Simulation and experimental analysis of PCM-enhanced solar stills using CMS. 10- Employing a vertical wick, reflector, and Nano phase change material to improve the 11- Experimental investigation of double slope solar still integrated with 12- Exergy, exergo-economic, environmental and sustainability analysis of 13- Evaluation of efficiency of double slope solar still and drinking water yield using silver nanoparticle mixed with 14- Transient solidification and melting numerical simulation of 15- Enhancing conical solar still performance using 16- An experimental study of PCM-incorporated thermosyphon solar water heating system. 17- Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: comparative study with a 18- Theoretical and experimental investigation on a novel design of wick type solar still for 19- Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium. 20- Heat transfer coefficients and productivity of a single slope single basin solar still in 21- Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still. 22- Performance of a stepped solar still using porous materials experimentally. 23- Experimental analysis of two stage solar still integrated with 24- Experimental Study and Energy and Exergy ...

مدل سازی ریاضی و بررسی عملکرد آب شیرین کن صفحه تخت با مواد متخلخل و تغییر فاز دهنده از دیدگاه انرژی و انرژی

کامیار کریمی بیرگانی^۱، میلاد ستاره^{۱*}، حسن بصیرت تبریزی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر مشکل کمبود آب شرب به یکی از جدی‌ترین چالش‌های بشر تبدیل شده است. به همین دلیل، بررسی عملکرد سیستم‌های تصفیه آب از موضوعات مورد علاقه محققین بوده است. همچنین با توجه به افزایش مصرف انرژی و استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی در حال فراگیر شدن می‌باشد. در این پژوهش، مدل سازی ریاضی آب شیرین کن خورشیدی صفحه تخت با مواد متخلخل و مواد تغییر فاز دهنده و بررسی عملکرد آن از دیدگاه انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی عملکرد آب شیرین کن، روابط موازنه انرژی برای بخش‌های مختلف شامل شیشه، آب شور، صفحه جاذب و ماده تغییر فاز دهنده نوشته شده و با حل معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار متلب، تأثیر حضور ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده به عنوان نوآوری پژوهش حاضر بر بهره‌وری آب شیرین کن و بازده انرژی و انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، بازده کلی انرژی و انرژی با حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده به ترتیب به مقدار ۱۵/۰۷٪ و ۱۱/۰۴٪ نسبت به حالت پایه، در حالت ماده تغییر فاز دهنده به ترتیب به مقدار ۱۱/۰۴٪ و ۰/۶۲٪ نسبت به حالت پایه و در حالت ماده متخلخل به ترتیب به مقدار ۳/۱۵٪ و ۰/۳۲٪ نسبت به حالت پایه بهبود می‌یابد. همچنین تولید آب شیرین در حالت حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده، ماده تغییر فاز دهنده به تنهایی و ماده متخلخل به تنهایی به ترتیب به مقدار ۲۳/۷۲٪، ۱۷/۸۸٪ و ۶/۱۷٪ بیشتر از حالت پایه است.

کلیدواژه‌ها: آب شیرین کن، ماده متخلخل، ماده تغییر فاز دهنده، بازده، انرژی، انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

*نویسنده مسئول: msetare@jsu.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسئله کمبود آب آشامیدنی به یک مشکل فراگیر تبدیل شده است. رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و استفاده نادرست از منابع آبی، همگی دست به دست هم داده‌اند تا این مشکل را تشدید کند. این بحران نه تنها بر سلامتی و رفاه انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه به کاهش تولیدات کشاورزی و افزایش تنش‌های اجتماعی نیز منجر می‌شود. علی‌رغم اینکه سطح وسیعی از زمین را آب فرا گرفته است، تنها ۰/۵٪ از آن می‌تواند، مستقیماً توسط انسان و سایر موجودات زنده مورد استفاده قرار بگیرد^[۱]. لذا بشر ناچار به یافتن راهی برای بهره برداری از آب‌های شور دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشد. در این راستا، روش‌های

متنوعی برای تصفیه و نمک زدایی آب دریا ابداع شده است. چالش‌های مرتبط با انرژی‌های فسیلی و اثرات مخرب آنها بر روی محیط زیست، باعث توجه روزافزون به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. شیرین‌سازی آب با استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یکی از روش‌های مقرون به صرفه نمک‌زدایی حرارتی محسوب می‌شود^[۱]. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با استفاده از انرژی حرارتی خورشید، شیرین‌سازی آب را به روش تبخیر و میعان، انجام می‌دهند. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی در انواع مختلف طراحی می‌شوند. برخی از معروف‌ترین انواع آن عبارتند از: ۱- آب شیرین‌کن حوضچه‌ای یا صفحه تخت، ۲- آب شیرین‌کن پلکانی، ۳- آب شیرین‌کن فیتیله‌ای، ۴- آب شیرین‌کن دودکشی. آب شیرین‌کن حوضچه‌ای از پرکاربردترین آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. در این نوع، از حوضچه‌ای عایق بندی شده که در کف آن صفحه جاذب حرارت قرار گرفته و روی آن پوشش شفاف شیشه‌ای شیب‌دار نصب شده، استفاده می‌گردد. فرآیند شیرین سازی در آب شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای به این صورت است که انرژی تابش خورشید توسط صفحه جاذب، جذب شده و در نتیجه آب شور درون محفظه آب شیرین‌کن گرم می‌شود. با افزایش دمای آب شور و هوای محبوس در محفظه، بخشی از آب شور تبخیر سطحی شده و به همراه هوای مرطوب که دارای چگالی پایین‌تری می‌باشد، به سمت بالا حرکت می‌کنند. پس از برخورد با سطح بالایی (سطح داخلی شیشه)، به دلیل پایین بودن دمای این سطح، بخشی از بخار آب موجود در هوا بر روی سطح شیشه، چگالیده می‌شود. آب چگالیده شده بر روی سطح شیشه بدلیل نیروی گرانش بر روی سطح شیشه به سمت پایین حرکت کرده و در نهایت، آب شیرین تولید شده جمع‌آوری می‌شود.

با توجه به اینکه، انرژی خورشیدی تنها در روز در دسترس می‌باشد، لذا کاربرد آن نیاز به یک سامانه کارآمد ذخیره سازی انرژی دارد. روش مرسوم در ذخیره سازی انرژی حرارتی، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور ذخیره انرژی به صورت گرمان نهان می‌باشد که این امر، منجر به بهبود عملکرد کلی آب شیرین‌کن خواهد شد^[۲]. به منظور بهبود بیشتر در عملکرد آب شیرین‌کن می‌توان از مواد متخلخل مانند پارچه نمدی بر روی صفحه جاذب استفاده کرد. بدین ترتیب، ضرایب انتقال حرارت و میزان سطح انتقال حرارت با آب شور افزایش یافته و در نتیجه انتظار می‌رود که بهره‌وری کلی سامانه ارتقا یابد. برخی از مواد تغییر فاز دهنده که در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند، شامل نمک‌های هیدرات شده، پارافین و اسیدهای چرب می‌باشند. موادی که در دمای کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد ذوب شده، در کاربردهای تهویه مطبوع استفاده می‌شوند درحالی‌که موادی که در دمای بالای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ذوب شوند در فرآیندهای تبرید جذبی به کار می‌روند. سایر مواد با دمای ذوب

صفحه جاذب با یک لایه ماده متخلخل، میزان تولید آب شیرین، به مقدار ۱۵۵٪ بهبود می‌یابد. آولابی و همکاران^[11] به بررسی تجربی اثر استفاده از مواد تغییر فازدهنده میکروکپسول بر بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی دو شیب پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که میزان تولید آب شیرین با حضور مواد تغییر فازدهنده میکروکپسول به مقدار ۱۵۰٪ بهبود می‌یابد و همچنین مدت زمان کارکرد آب شیرین‌کن با حضور مواد تغییر دهنده به مقدار ۳ ساعت بیشتر از آب شیرین‌کن بدون مواد تغییر فاز دهنده است. آنیکا و همکاران^[12] به بررسی آگرژی اکونومی و اثرات محیط زیستی آب شیرین‌کن خورشیدی هرمی تجهیز شده با مواد تغییر فاز دهنده و لایه اسفنج به عنوان محیط متخلخل در شرایط جغرافیایی کشور بنگلادش پرداختند. نتایج نشان داد که با حضور موارد گفته شده، میزان تولید آب شیرین به مقدار ۹۲٪ بهبود یافته و بازه آگرژی به مقدار ۸۰/۶۳٪ بیشتر می‌شود. شاجاهان و همکاران^[13] به مطالعه تجربی اثر استفاده از ترکیب نانو ذرات نقره با مواد تغییر فاز دهنده برای عمق‌های مختلف آب شور، بر عملکرد آب شیرین‌کن دو شیب پرداختند. نتایج نشان دادند که با استفاده همزمان نانو ذرات نقره با مواد تغییر فاز دهنده، تولید آب شیرین و بازه حرارتی در دوره زمانی فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده، به ترتیب به مقدار ۷/۶۴٪ و ۵/۲۶٪ کاهش می‌یابد. با این وجود، تولید آب شیرین تا بعد از غروب آفتاب بدلیل استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، ادامه می‌یابد.

تعدادی از محققان نیز به مدلسازی عددی تاثیر پارامترهای مختلف مانند مواد تغییر فاز دهنده، ماده متخلخل، فین و غیره بر عملکرد انواع مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی پرداخته‌اند. حسین و همکاران^[14] مدلسازی عددی فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده اسید لوریک قرار گرفته درون پله‌های آب شیرین‌کن خورشیدی پله‌ای را انجام دادند. نتایج نشان داد که فرایند ذوب ماده تغییر فاز دهنده به عوامل مختلف مانند تعداد پله‌ها، ارتفاع آب شور روی پله‌ها، زاویه آب شیرین‌کن و شرایط جغرافیایی بستگی دارد. بادی و همکاران^[15] به مطالعه تأثیر استفاده از فین‌های فلزی حاوی ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد آب شیرین‌کن مخروطی پرداختند. نتایج نشان داد که با حضور ماده تغییر فاز دهنده، تولید آب شیرین به مقدار ۳۹/۱۷٪ بهبود می‌یابد.

با مطالعه پژوهش‌های انجام شده، مشخص گردید که مواد متخلخل و تغییر فاز دهنده اثر مثبتی بر عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی دارند. اکثر مطالعات پیشین به صورت تجربی بوده است و ارایه و توسعه مدلسازی ریاضی آب شیرین‌کن خورشیدی کمتر مورد توجه بوده است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر، به ارایه مدلسازی ریاضی و آنالیز انرژی و آگرژی آب شیرین‌کن خورشیدی صفحه تخت تک شیب با حضور مواد متخلخل و تغییر فاز دهنده، برای کاربرد در اقلیم‌های تابشی ایران پرداخته می‌شود. با توجه به این که شرایط تابش و سایر شرایط آب هوایی نظیر

بین این محدوده می‌توانند در کاربردهای مربوط به انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند^[3].

باتوجه به گستره روش‌های مختلف مورد استفاده برای نمک زدایی و تصفیه آب و تنوع روش‌های تامین انرژی آنها، تاکنون مطالعات گسترده‌ای در این موضوع و مخصوصاً استفاده از انرژی خورشیدی برای شیرین‌سازی آب انجام گرفته است. سیواسانکار و همکاران^[4] به بررسی تجربی بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از ماده متخلخل از جنس پشم و پلی‌استر پرداختند. نتایج نشان داد که تولید آب شیرین در حالت استفاده از مواد متخلخل، به طور متوسط به مقدار ۳۵/۳۵٪ بهبود می‌یابد. خان و همکاران^[5] به بررسی و تحلیل اثر استفاده از ترکیب نانو ذرات اکسید آلومینیوم با مواد تغییر فازدهنده بر بهره‌وری آب شیرین‌کن تک شیب پرداختند. این محققان از پارافین به عنوان ماده تغییر فازدهنده استفاده کردند و نتایج گزارش شده، نشان داد که ترکیب نانو ذرات پارافین، باعث بهبود حدوداً ۱۰٪ در تولید آب شیرین شده است. گوپتا و سلوانکی^[6] به بررسی تأثیر استفاده از روش‌های مختلف شامل مواد تغییر فازدهنده یوتکتیک، نانو ذرات و مواد متخلخل فلزی بر عملکرد یک آب شیرین‌کن دو شیب پرداختند. این محققان، اثر روش‌های مذکور را به صورت تک به تک و همچنین به صورت ترکیب چندین روش با همدیگر، مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در حالت ترکیب نانو ذرات اکسید نقره با مواد تغییر فاز دهنده، تولید آب شیرین نسبت به آب شیرین‌کن پایه (بدون مواد تغییر فازدهنده و نانو ذرات)، به مقدار ۲۴/۱٪ بهبود می‌یابد.

الامی و همکاران^[7] به بررسی تجربی اثر بکارگیری همزمان بازتاب دهنده، مواد متخلخل، مواد تغییر فازدهنده بهبود یافته با نانو ذرات و کندانسور بر روی عملکرد یک آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج نشان داد که در این حالت، تولید آب شیرین به میزان ۲۴۶٪ بیشتر از آب شیرین‌کن بدون استفاده از روش‌های مذکور است. در پژوهشی دیگر، الامی و همکاران^[8] عملکرد حرارتی یک آب شیرین‌کن لوله‌ای خورشیدی با حضور مواد تغییر فازدهنده، بازتاب دهنده، مواد متخلخل و فین را مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقدار تولید آب شیرین با حضور همه روش‌های مذکور به میزان ۲۵۶٪ افزایش می‌یابد. شارما و بیرلا^[9] بررسی تجربی و عددی اثر مواد تغییر فاز دهنده بر بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب را انجام دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، تولید آب شیرین به میزان ۲۰٪ بهبود می‌یابد. همچنین نتایج آنالیز اقتصادی، نشان داد که دوره برگشت سرمایه برای آب شیرین‌کن با حضور مواد تغییر فازدهنده برابر با ۲۰۵ روز می‌باشد. یونس و همکاران^[10] به بررسی تجربی و تحلیل ترمودینامیکی آب شیرین‌کن خورشیدی با حضور بازتاب‌دهنده، ماده متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که با پوشاندن

هوای شهر دزفول، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نحوه قرارگیری اجزای مختلف در کلکتور آب شیرین‌کن مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. طول و عرض کلکتور به ترتیب ۲ و ۱ متر بوده و از ماده متخلخل پشم با ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شده است. بعلاوه، پارافین واکس به عنوان ماده تغییر فازدهنده در یک محفظه با ارتفاع ۵ سانتی‌متر، متصل شده به صفحه کف کلکتور، در نظر گرفته شده است.

مجموعه پارامترهای طراحی و خواص ترموفیزیکی و نوری برای مدلسازی و مقایسه با نتایج تجربی، در جدول ۱ آورده شده است.

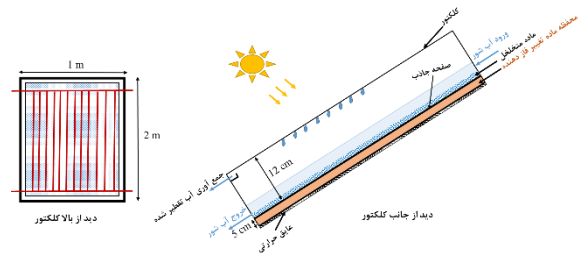
۲-۲- روابط حاکم و مدلسازی ریاضی

تحقیقات تجربی می‌تواند گران، پر زحمت و زمان بر باشد. از اینرو، مدلسازی ریاضی یک جایگزین جذاب برای بررسی و توسعه طرح‌های بهتر برای دستگاه‌های آب شیرین‌کن خورشیدی تحت پارامترهای عملیاتی مختلف است. مدل حاضر با استفاده از برنامه متلب توسعه داده شده و فرضیات در نظر گرفته شده برای ساده‌سازی تحلیل عبارتند از:

- هیچ نشستی بخار در دستگاه آب شیرین‌کن وجود ندارد.
- در مقایسه با ظرفیت گرمایی آب حوضچه، ظرفیت حرارتی مواد عایق مورد استفاده در دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی ناچیز است.
- خواص ترموفیزیکی آب ثابت است.
- تمام آب شور تبخیر شده، بر روی شیشه کلکتور چگالش می‌شود. در صورتیکه آنالیز آب شیرین‌کن خورشیدی به بخش‌هایی مانند حوضچه، شیشه و آب حوضچه و همچنین فرآیندهای انتقال حرارت داخلی و انتقال حرارت خارجی تقسیم شود، ارزیابی توزیع انتقال حرارت در دستگاه آب شیرین‌کن و محاسبه نرخ انتقال حرارت در بخش‌های مختلف، آسان‌تر می‌شود. چند بخش بعدی، معادلات مورد استفاده برای مدل فعلی را توصیف می‌کنند.

۲-۲-۱- آنالیز حرارتی

شکل ۲ شبکه‌های مقاومت حرارتی المان‌های آب شیرین‌کن را در حالت‌های با و بدون ماده تغییر فاز دهنده نشان می‌دهد. T_s, T_a, T_p, T_w, T_g به ترتیب دمای هوا، دمای خورشید، دمای شیشه، دمای آب شور، دمای صفحه جذب و دمای ماده تغییر فازدهنده می‌باشند. همچنین $X_p, h_1, h_{cwg}, h_{nwg}, h_{ewg}, h_{rgs}, h_{cga}$ و U_b و k_p به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی معادل بین شیشه و آسمان، ضریب انتقال حرارت تبخیر، ضریب انتقال حرارت تشعشعی معادل بین شیشه و آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب شور و شیشه، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب شور و صفحه جذب، ضخامت صفحه جذب، ضریب هدایت حرارتی صفحه جذب و ضریب اتلاف حرارت از کف کلکتور می‌باشند.



شکل ۱) هندسه آب شیرین‌کن خورشیدی مورد مطالعه

جدول ۱) پارامترهای طراحی، خواص فیزیکی و نوری [16-18]

شماره	پارامتر مرتبط	مقدار
۱	ضریب جذب شیشه (α_g)	۰/۰۵
۲	ضریب جذب آب (α_w)	۰/۰۵
۳	ضریب جذب صفحه جاذب پوشیده شده با ماده متخلخل (α_p)	۰/۹۵
۴	ضریب انعکاس شیشه (R_g)	۰/۰۵
۵	ضریب انعکاس آب (R_w)	۰/۰۵
۶	ضریب صدور شیشه (ϵ_g)	۰/۹
۷	ضریب صدور آب (ϵ_w)	۰/۹
۸	ضریب صدور موثر بین آب و شیشه (ϵ_{eff})	۰/۸۲
۱۰	ظرفیت گرمایی ویژه آب داخل حوضچه (c_w)	$4180 \frac{J}{kg K}$
۱۱	سطح مقطع حوضچه (A_b)	$2 m^2$
۱۶	ثابت استفان بولتزمن (σ)	$5/6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$
۱۹	دمای ذوب پارافین واکس (T_m)	$56 \text{ } ^\circ C$
۲۰	هدایت حرارتی پارافین واکس (k_{pcm})	$0/4 \frac{W}{m.K}$
۲۱	گرمای ویژه پارافین واکس جامد ($c_{pcm,s}$)	$2400 \frac{J}{kg K}$
۲۱	گرمای ویژه پارافین واکس مایع ($c_{pcm,l}$)	$1600 \frac{J}{kg K}$
۲۲	گرمای نهان ذوب پارافین واکس (L_{pcm})	$142700 \frac{J}{kg}$
۲۳	چگالی فاز مایع پارافین واکس (ρ_l)	$640 \frac{kg}{m^3}$
۲۴	چگالی فاز جامد پارافین واکس (ρ_s)	$670 \frac{kg}{m^3}$

درجه حرارت و سرعت باد در ایران مناسب بوده، ضروری است، عملکرد حرارتی یک آب شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای با شیب یک طرفه در شرایط اقلیمی تابشی مختلف ایران مورد بررسی قرار گیرد. چهار حالت اعم از حالت پایه، حالت ماده متخلخل، ماده تغییر فاز دهنده و هردو ماده با هم مورد بررسی قرار می‌گیرند و میزان تولید آب شیرین و بازده انرژی و آگزرژی ارزیابی می‌شوند. قابل ذکر است، استفاده همزمان از ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده و همچنین ارایه آنالیز انرژی و آگزرژی از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

۲- توصیف هندسه و ارایه روابط حاکم و مدلسازی ریاضی

۲-۱- هندسه و پارامترهای طراحی و خواص ترموفیزیکی

در این مطالعه، به مدلسازی ریاضی آب شیرین‌کن خورشیدی به تنهایی و همراه با ماده متخلخل پشم و ماده تغییر فاز دهنده پرداخته و عملکرد آن از منظر انرژی و آگزرژی در شرایط آب و

نداشته باشد، معادله انرژی برای آن بیان نخواهد شد و معادله انرژی برای صفحه جاذب، به صورت زیر اصلاح خواهد شد:

$$I\alpha_{p,eff} = h_1(T_p - T_w) + U_b(T_p - T_a) \quad (5)$$

از حل معادلات (۱) و (۳)، دمای شیشه و سطح جاذب برابر می شوند با:

$$T_g = \frac{I\alpha_{g,eff} + h_{rgs}T_s + h_{cga}T_a + h_2T_w}{h_2 + h_{rgs} + h_{cga}} \quad (6)$$

$$T_p = \frac{I\alpha_{p,eff} + h_1T_w + \frac{k_p}{X_p}T_{pcm}}{h_1 + \frac{k_p}{X_p}} \quad (7)$$

در صورتیکه ماده تغییر فاز دهنده وجود نداشته باشد، بجای T_{pcm} و $\frac{k_p}{X_p}$ در رابطه (۷) به ترتیب مقدار T_a و U_b قرار داده می شود. همچنین رابطه (۶) بدون تغییر باقی می ماند. با جایگذاری روابط (۶) و (۷) در روابط (۲) و (۴) دماهای آب شور و ماده تغییر فاز دهنده برابر می شوند با [19]:

$$T_w = \frac{f c n_0(t)}{c_0} \left[1 - e^{-\frac{c_0 t}{m_w c_w} \frac{A_p}} \right] + T_{wi} e^{-\frac{c_0 t}{m_w c_w} \frac{A_p}} \quad (8)$$

$$T_{pcm} = \frac{f c n_1(t)}{c_1} \left[1 - e^{-\frac{c_1 t}{m_{pcm} c_{pcm}} \frac{A_p}} \right] + T_{pcmi} e^{-\frac{c_1 t}{m_{pcm} c_{pcm}} \frac{A_p}} \quad (9)$$

که T_{wi} و T_{pcmi} دمای آب و ماده تغییر فاز دهنده در زمان اولیه می باشند. در صورتیکه ماده تغییر فاز دهنده وجود نداشته باشد از رابطه (۱۰) برای محاسبه دمای آب شور استفاده می شود [19]:

$$T_w = \frac{f c n_2(t)}{c_2} \left[1 - e^{-\frac{c_2 t}{m_w c_w} \frac{A_p}} \right] + T_{wi} e^{-\frac{c_2 t}{m_w c_w} \frac{A_p}} \quad (10)$$

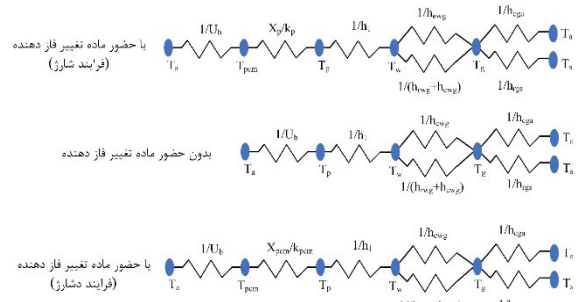
با توجه به معادله های موازنه انرژی در روابط (۱) تا (۴)، مقادیر $f c n(t)$ عبارتند از:

$$f c n_0(t) = I\alpha_{w,eff} + \frac{I h_1 \alpha_{p,eff} + h_1 \frac{k_p}{X_p} T_{pcm}}{h_1 + \frac{k_p}{X_p}} + \frac{I h_2 \alpha_{g,eff} + h_2 h_{rgs} T_s + h_2 h_{cga} T_a}{h_2 + h_3} \quad (11)$$

$$f c n_1(t) = U_b T_a + \frac{I \frac{k_p}{X_p} \alpha_{p,eff} + h_1 \frac{k_p}{X_p} T_w}{h_1 + \frac{k_p}{X_p}} \quad (12)$$

$$f c n_2(t) = I\alpha_{w,eff} + \frac{I h_1 \alpha_{p,eff} + h_1 U_b T_a}{h_1 + U_b} + \frac{I h_2 \alpha_{g,eff} + h_2 h_{rgs} T_s + h_2 h_{cga} T_a}{h_2 + h_3} \quad (13)$$

همچنین مقادیر ضرایب c ، به صورت زیر بدست آورده می شوند:



شکل ۲) شبکه مقاومت حرارتی برای آب شیرین کن با و بدون ماده تغییر فاز دهنده

۲-۱-۲-۲- فرایند شارژ

بر اساس مفروضات فوق و با کمک شبکه مقاومت های حرارتی نشان داده شده در شکل ۲، معادله موازنه انرژی برای شیشه برابر می شود با:

$$I\alpha_{g,eff} + h_2(T_w - T_g) = h_{rgs}(T_g - T_s) + h_{cga}(T_g - T_a) \quad (1)$$

که مقدار تشعشع خورشید برخورد کرده به شیشه، α_g ضریب جذب شیشه، R_g ضریب انعکاس شیشه و $h_2 = h_{ewg} + h_{rwg} + h_{cwg}$ به منظور محاسبات راحت تر، مقدار $h_3 = h_{rgs} + h_{cga}$ عنوان ضریب کلی انتقال حرارت خارجی نامیده می شود. موازنه انرژی برای آب شور در آب شیرین کن، به صورت زیر نوشته می شود:

$$I\alpha_{w,eff} + h_1(T_p - T_w) = h_2(T_w - T_g) + \frac{m_w c_w}{A_p} \frac{dT_w}{dt} \quad (2)$$

که A_p مساحت صفحه جاذب، α_w ضریب جذب آب شور و R_w ضریب انعکاس آب شور می باشند.

معادله انرژی برای صفحه جاذب کلکتور نیز به صورت رابطه (۳) بیان می شود:

$$I\alpha_{p,eff} = h_1(T_p - T_w) + \frac{k_p}{X_p}(T_p - T_{pcm}) \quad (3)$$

که α_p ضریب جذب صفحه کلکتور پوشیده شده با ماده متخلخل است.

موازنه انرژی برای ماده تغییر فاز دهنده نیز با توجه به انتقال حرارت آن به سطح جاذب و محیط، به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{k_p}{X_p}(T_p - T_{pcm}) = \frac{m_{pcm} c_{pcm}}{A_p} \frac{dT_{pcm}}{dt} + U_b(T_{pcm} - T_a) \quad (4)$$

که در رابطه بالا، c_{pcm} ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت بوده بر حسب اینکه ماده تغییر فاز دهنده در فاز جامد یا مایع باشد، مقدار آن تعیین می گردد. در صورتیکه ماده تغییر فاز دهنده به دمای ذوب برسد، مقدار دمای آن تا انتهای فرایند ذوب، تقریباً ثابت مانده و ترم اول سمت راست در رابطه (۴) با ترم $m_{pcm} L_{pcm}$ جایگزین می شود که L_{pcm} انتالپی ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. همچنین لازم به ذکر است در صورتیکه ماده تغییر فاز دهنده وجود

$$T_p = \frac{h_1 T_w + \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} T_{pcm}}{h_1 + \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}}} \quad (26)$$

با جایگذاری روابط (۲۵) و (۲۶) در روابط (۲۱) و (۲۳)، دماهای ماده تغییر فاز دهنده و آب شور برابر می‌شوند با:

$$T_w = \frac{f_{cn3}(t)}{c_0} \left[1 - e^{-\frac{c_2 t}{m_w c_w}} \right] + T_{wi} e^{-\frac{c_2 t}{m_w c_w}} \quad (27)$$

$$T_{pcm} = \frac{f_{cn4}(t)}{c_4} \left[1 - e^{-\frac{c_4 t}{m_{pcm} c_{pcm}}} \right] + T_{pcmi} e^{-\frac{c_4 t}{m_{pcm} c_{pcm}}} \quad (28)$$

که در روابط بالا، T_{pcmi} و T_{wi} به ترتیب، دمای اولیه آب شور و ماده تغییر فازدهنده در شروع فرایند دشارژ هستند. با استفاده از روابط (۲۰) الی (۲۴)، مقادیر c_4 ، c_3 ، c_2 ، $f_{cn4}(t)$ و $f_{cn3}(t)$ برابر هستند با:

$$f_{cn3}(t) = \frac{h_2 h_{rgs} T_s + h_2 h_{cga} T_a}{h_2 + h_3} + \frac{h_1 \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} T_{pcm}}{h_1 + \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}}} \quad (29)$$

$$f_{cn4}(t) = U_b T_a + \frac{h_1 \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} T_w}{h_1 + \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}}} \quad (30)$$

$$c_3 = \frac{h_1 \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}}}{h_1 + \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}}} + \frac{h_2 h_3}{h_2 + h_3} \quad (31)$$

$$c_4 = \frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} + U_b \quad (32)$$

تاکنون، دماها بر حسب ضرایب انتقال حرارت بدست آورده شده‌اند. در ادامه به ارایه روابطی برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت و مقدار شارهای حرارتی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۲- محاسبه ضرایب انتقال حرارت

نرخ انتقال حرارت جابجایی بر واحد سطح Q_{cwg} بین آب و سطح داخلی شیشه توسط رابطه (۳۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_{cwg} = h_{cwg} (T_w - T_g) \quad (33)$$

که ضریب انتقال حرارت h_{cwg} به صورت زیر بیان می‌شود^[17]:

$$h_{cwg} = 0.884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273.15)}{268900 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

فشار اشباع آب در دمای شیشه و آب شور به ترتیب P_w و P_g را می‌توان با استفاده از معادلات (۳۵) و (۳۶) بدست آورد^[1]:

$$P_w = e^{\left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273.15} \right)} \quad (35)$$

$$P_g = e^{\left(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273.15} \right)} \quad (36)$$

$$c_0 = \frac{h_1 \frac{k_p}{X_p}}{h_1 + \frac{k_p}{X_p}} + \frac{h_2 h_3}{h_2 + h_3} \quad (14)$$

$$c_1 = \frac{h_1 \frac{k_p}{X_p}}{h_1 + \frac{k_p}{X_p}} + U_b \quad (15)$$

$$c_2 = \frac{h_1 U_b}{h_1 + U_b} + \frac{h_2 h_3}{h_2 + h_3} \quad (16)$$

همچنین مقادیر مؤثر ضرایب جذب برابر هستند با:

$$\alpha_{g,eff} = (1 - R_g) \alpha_g \quad (17)$$

$$\alpha_{w,eff} = (1 - R_g)(1 - \alpha_g)(1 - R_w) \alpha_w \quad (18)$$

$$\alpha_{p,eff} = (1 - R_g)(1 - \alpha_g)(1 - R_w)(1 - \alpha_w) \alpha_p \quad (19)$$

تاکنون معادلات موازنه انرژی در حالت شارژ ماده تغییر فاز دهنده ارایه شدند. برای حالت دشارژ که شار حرارتی خورشیدی برابر با صفر در نظر گرفته شده، مقادیر دما و موازنه انرژی برای اجزای مختلف باید ارایه گردند.

۲-۱-۲-۲ فرایند دشارژ

در حالت دشارژ، معادله موازنه انرژی برای ماده تغییر فاز دهنده در صورتیکه دمای آن برابر با دمای تغییر فاز باشد، با رابطه (۲۰) و در صورتیکه دمای آن برابر با دمای تغییر فاز نباشد، با رابطه (۲۱) محاسبه می‌شوند.

$$m_{pcm} L_{pcm} = A_p \Delta t \left(\frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} (T_{pcm} - T_p) + U_b (T_{pcm} - T_a) \right) \quad (20)$$

$$\frac{m_{pcm} c_{pcm} dT_{pcm}}{A_p dt} = -\frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} (T_{pcm} - T_p) - U_b (T_{pcm} - T_a) \quad (21)$$

موازنه انرژی با توجه به شبکه مقاومت حرارتی نشان داده در شکل ۲ برای صفحه شیشه، آب و صفحه جاذب به ترتیب در روابط (۲۲) تا (۲۴) بدست آورده می‌شوند:

$$h_2 (T_w - T_g) = h_{rgs} (T_g - T_s) + h_{cga} (T_g - T_a) \quad (22)$$

$$h_1 (T_p - T_w) = h_2 (T_w - T_g) + \frac{m_w c_w}{A_p} \frac{dT_w}{dt} \quad (23)$$

$$\frac{k_{pcm}}{X_{pcm}} (T_{pcm} - T_p) = h_1 (T_p - T_w) \quad (24)$$

دمای شیشه و صفحه جاذب به ترتیب با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۴) برابر می‌شوند با:

$$T_g = \frac{h_{rgs} T_s + h_{cga} T_a + h_2 T_w}{h_2 + h_{rgs} + h_{cga}} \quad (25)$$

۲۵۰ $\frac{W}{m^2}$ و بین سطح کف کلکتور و محیط برابر با $\frac{W}{m^2}$ ۲/۸ در نظر گرفته می‌شوند [20].

۲-۳- تولید آب شیرین و بازده انرژی و انرژی

بدست آوردن آب شیرین تولید شده با استفاده از مقدار کل انتقال حرارت تبخیر بر واحد سطح Q_{ewg} محاسبه می‌گردد. در واقع، با تقسیم مقدار کل انتقال حرارت تبخیر بر مقدار انرژی لازم برای تبخیر آب (انتالپی تبخیر)، مقدار دبی جرمی تبخیر آب شور بدست می‌آید. با فرض اینکه، تمام جرم آب شور تبخیر شده، بر روی شیشه چگالش شود، دبی جرمی آب شیرین کنده شده با دبی جرمی آب شور تبخیر شده برابر شده و با رابطه (۴۷) محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_w = \frac{Q_{ewg} \times A_p}{L_w} \times 3600 \quad (47)$$

که L_w انتالپی تبخیر آب بوده و طبق رابطه (۴۸) و (۴۹) برابر است با:

$$L_w = 3.1615(10^6 - 761.6T_w) \quad T_w > 70^\circ C \quad (48)$$

$$L_w = 2.4935 \left(\frac{10^6 - 947.79T_w + 0.13132T_w^2 - 0.0047974T_w^3}{T_w} \right) \quad T_w < 70^\circ C \quad (49)$$

که دمای آب در رابطه بالا برحسب درجه سانتیگراد می‌باشد [8]. بازده ساعتی انرژی به صورت رابطه (۵۰) محاسبه می‌شود [22]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_w L_w}{A_p I \times 3600} \quad (50)$$

و بازده کل انرژی در طی یک روز به صورت رابطه (۵۱) بدست می‌آید [23].

$$\eta_{th,d} = \frac{\sum \dot{m}_w L_w}{A_p \sum I \times 3600} \quad (51)$$

موازنه انرژی در آب شیرین کن به صورت رابطه (۵۲) نوشته می‌شود [23]:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest.} \quad (52)$$

که $\dot{E}x_{in}$ نشان دهنده انرژی ورودی، $\dot{E}x_{out}$ نشان دهنده انرژی خروجی و $\dot{E}x_{dest.}$ انرژی تلف شده است. بازده انرژی آب شیرین کن خورشیدی به صورت رابطه (۵۳) تعریف می‌شود [23]:

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum \dot{E}x_{out}}{\sum \dot{E}x_{in}} \quad (53)$$

که مقادیر $\dot{E}x_{in}$ و $\dot{E}x_{out}$ به ترتیب مربوط به انرژی خورشید و انرژی تبخیر بوده و برابر هستند با [22]:

$$\dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{sun} = I A_p \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a + 273.15}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a + 273.15}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (54)$$

$$\dot{E}x_{out} = \dot{E}x_{evp.} = \frac{\dot{m}_w L_w}{3600} \left(1 - \frac{T_a + 273.1}{T_w + 273.1} \right) \quad (55)$$

که مقدار دمای خورشید $T_{sun} = 6000 K$ فرض می‌شود.

انتقال حرارت تبخیر بین آب و سطح داخلی شیشه رخ می‌دهد و زمانی ایجاد می‌شود که فشار بخار کمتر از فشار اشباع مایع باشد. انتقال حرارت تبخیر بر واحد سطح Q_{ewg} را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$Q_{ewg} = h_{ewg}(T_w - T_g) \quad (37)$$

ضریب انتقال حرارت تبخیر توسط رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود [20]:

$$h_{ewg} = 0.0163 \times h_{cwg} \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (38)$$

انتقال حرارت تشعشی بین آب درون آب شیرین کن و سطح داخلی شیشه نیز انجام می‌شود و مقدار آن بر واحد سطح برابر است با:

$$Q_{rwg} = h_{rwg}(T_w - T_g) \quad (39)$$

ضریب انتقال حرارت تشعشی توسط رابطه (۴۰) محاسبه می‌شود:

$$h_{rwg} = \varepsilon_{eff} \sigma \frac{[(T_w + 273.15)^4 - (T_g + 273.15)^4]}{(T_w - T_g)} \quad (40)$$

ضریب انتقال حرارت تشعشی مؤثر ε_{eff} بین سطح شیشه و آب با فرض برابر بودن سطح مؤثر انتقال حرارت آب و شیشه، برابر می‌شود با:

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)^{-1} \quad (41)$$

انتقال حرارت تشعشی بین سطح شیشه و آسمان بر واحد سطح، برابر است با:

$$Q_{rgs} = h_{rgs}(T_g - T_s) \quad (42)$$

ضریب انتقال حرارت تشعشی توسط رابطه (۴۳) محاسبه می‌شود:

$$h_{rgs} = \varepsilon_g \sigma \frac{[(T_g + 273.15)^4 - (T_s + 273.15)^4]}{(T_g - T_s)} \quad (43)$$

که مقدار دمای آسمان T_s برابر است با [20]:

$$T_s = 0.0522 T_a^{1.5} \quad (44)$$

نرخ انتقال حرارت جابجایی بر واحد سطح بین سطح شیشه و محیط، برابر است با:

$$Q_{cga} = h_{cga}(T_g - T_a) \quad (45)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح شیشه و محیط طبق رابطه (۴۶) محاسبه می‌شود [20]:

$$h_{cga} = \begin{cases} 2.8 + 3V_a & V_a \leq 5 \frac{m}{s} \\ 5.7 + 3.8V_a & V_a > 5 \frac{m}{s} \end{cases} \quad (46)$$

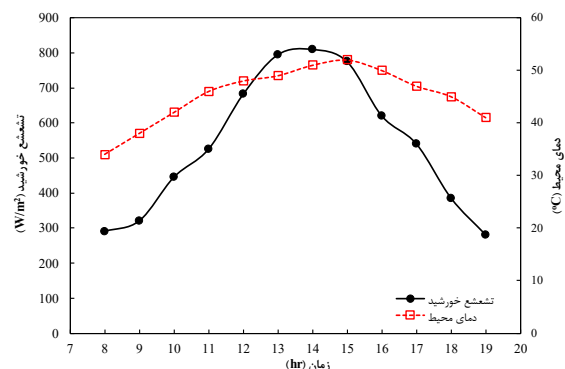
که V_a سرعت باد محیطی است. ضریب انتقال حرارت جابجایی بین آب شور و سطح جاذب h_1 طبق پیشنهاد گوار و تیواری [21] برابر با

۳- ارایه نتایج و بحث

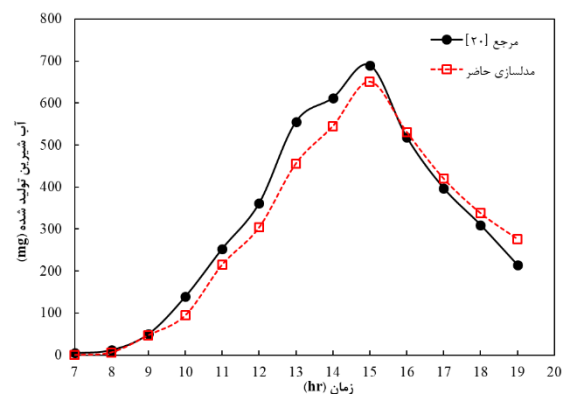
به منظور ارایه نتایج، از شرایط جغرافیایی و تشعشع خورشید در شهرستان دزفول که در طول جغرافیایی ۴۸/۳۹۹۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲/۳۸۴۰ درجه شمالی واقع شده، استفاده می‌گردد. تشعشع و دمای خورشید در شهرستان دزفول در فصل تابستان از مرجع [24] استخراج شده و در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

۳-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبار سنجی، مقایسه‌ای بین نتایج مدل حاضر با نتایج بدست آمده از مرجع [20] در شکل ۴ انجام شده است. در مرجع [20]، آزمایش‌های تجربی با عمق‌های مختلفی از آب شور در یک آب شیرین‌کن حوضچه‌ای انجام شده است. نتایج پژوهش حاضر با آزمایش‌های تجربی با عمق آب شور برابر با ۴ میلی متر مقایسه شده‌اند. با آنالیز آماری داده‌ها، مشخص می‌شود که مقدار میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) به ترتیب مقدار ۳۷ میلی‌گرم و ۴۶/۲۵ میلی‌گرم، بدست می‌آیند. با توجه به همخوانی بسیار خوب نتایج مدل‌سازی و مرجع [20] در ادامه از مدل رایج شده در پژوهش حاضر، برای بررسی و تحلیل موردی سایر پارامترها استفاده شده است.



شکل ۳) تشعشع خورشید و دمای محیط در شهرستان دزفول در تابستان [24]



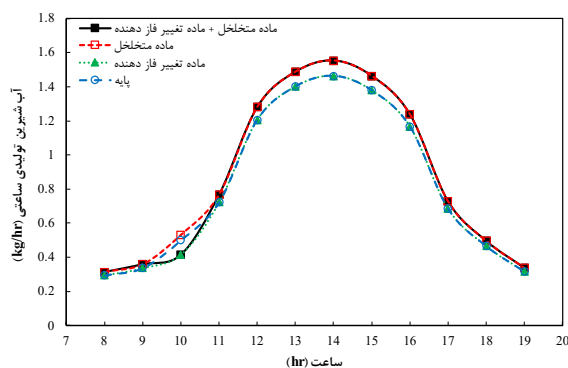
شکل ۴) مقایسه میزان آب شیرین تولید شده با کد محاسباتی حاضر و مرجع [20]

۳-۲- ارایه نتایج و بحث

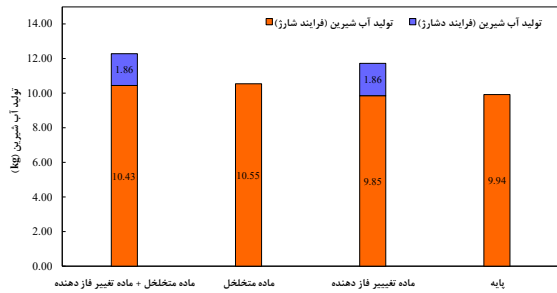
با توجه به دقت بسیار خوب مدل ارائه شده، در این قسمت عملکرد آب شیرین‌کن در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۵ تغییرات ساعتی میزان آب شیرین تولیدی برای حالت‌های مختلف را در طی صبح تا غروب، نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در ظهر، بیشترین مقدار تولید آب شیرین بدست می‌آید. در واقع، در ظهر بیشترین مقدار تشعشع خورشید بر روی سطح جاذب تابیده می‌شود و در نتیجه، دمای سطح جاذب بیشتر شده و آب شور نیز گرمتر می‌شود.

بنابراین، نرخ تبخیر بیشتر شده و در نتیجه، تولید آب شیرین بیشتر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان آب شیرین تولید شده در حالت حضور همزمان ماده متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده، از بقیه حالت‌ها بیشتر است. با حضور ماده متخلخل، سطح انتقال حرارت آب با سطح جاذب بیشتر شده و میزان نرخ انتقال حرارت نیز بیشتر می‌شود. پس می‌توان انتظار داشت که بهره‌وری آب شیرین‌کن، در این حالت نسبت به بقیه حالت‌ها بیشتر باشد. دمای آب و سطح جاذب، دو عامل مهم در تعیین بهره‌وری دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی هستند که در شکل ۶ برای دو حالت آب شیرین‌کن پایه (بدون ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده) و آب شیرین‌کن با حضور ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده، ترسیم شده‌اند.

در هر دو حالت، دمای سطح جاذب از دمای آب، بیشتر است زیرا تشعشع خورشید توسط سطح جاذب، جذب شده و سپس حرارت از سطح جاذب توسط مکانیزم انتقال حرارت جابجایی به آب منتقل می‌شود. هرچه سطح جاذب و در نتیجه دمای آب بیشتر باشد، میزان تبخیر، بیشتر می‌شود و همچنین هرچه دمای سطح شیشه، کمتر باشد، میزان بخار کندانس شده بیشتر می‌گردد. بکارگیری ماده متخلخل باعث می‌شود مقدار آب شیرین تولیدی ساعتی افزایش یابد که این افزایش، بدین دلیل است که ماده متخلخل با افزایش ضریب جذب حوضچه و همچنین کاهش عمق آب باعث افزایش دمای آب و افزایش نرخ تبخیر سطحی می‌شود.



شکل ۵) تولید ساعتی آب شیرین برای حالت‌های مختلف آب شیرین‌کن



شکل ۷) کل آب شیرین تولید شده

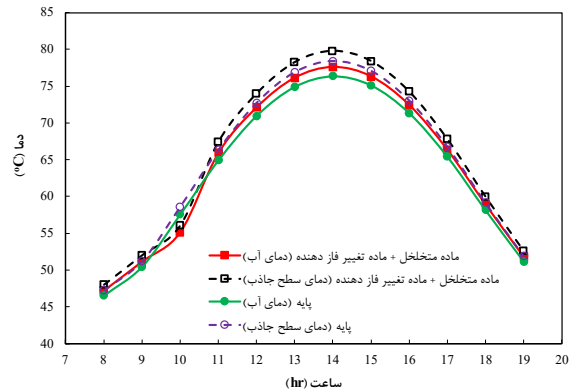
جدول ۲) بازه حرارتی ساعتی برای حالت های مختلف.

ساعت	پایه	ماده متخلخل	ماده تغییر فاز دهنده	ماده متخلخل + ماده تغییر فاز دهنده
8	41.90	44.57	41.90	44.57
9	45.04	47.83	45.04	47.83
10	49.53	52.59	41.36	41.15
11	53.45	56.73	53.45	56.73
12	56.19	59.61	56.19	59.61
13	57.77	61.25	57.77	61.25
14	58.32	61.83	58.32	61.83
15	57.93	61.40	57.93	61.40
16	56.52	59.92	56.52	59.92
17	53.97	57.23	53.97	57.23
18	50.25	53.29	50.25	53.29
19	45.92	48.70	45.92	48.70

جدول ۳) بازه انرژی ساعتی برای حالت های مختلف

ساعت	پایه	ماده متخلخل	ماده تغییر فاز دهنده	ماده متخلخل + ماده تغییر فاز دهنده
8	1.79	2.00	1.79	2.00
9	1.80	2.02	1.80	2.02
10	2.13	2.38	1.78	1.88
11	2.67	2.98	2.49	2.71
12	3.23	3.59	3.12	3.43
13	3.66	4.06	3.58	3.96
14	3.90	4.33	3.85	4.26
15	3.99	4.43	3.95	4.36
16	3.96	4.40	3.92	4.34
17	3.89	4.31	3.85	4.27
18	3.82	4.24	3.79	4.19
19	3.77	4.19	3.74	4.14

شکل ۸ بازه کلی انرژی و انرژی در طی یک شبانه روز را برای حالت های مختلف نشان داده است. مقادیر بازه کلی انرژی برای حالت های حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده، ماده متخلخل، ماده تغییر فاز دهنده و پایه به ترتیب برابر با ۷۸/۷۸٪، ۶۶/۸۶٪، ۷۵/۱۲٪ و ۶۳/۷۱٪ و مقادیر کلی بازه انرژی برای همین حالت ها به ترتیب برابر با ۴/۷۷٪، ۴/۰۵٪، ۴/۳۵٪ و ۳/۷۲٪ بدست آمده اند. با مقایسه نتایج بین حالت حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده با حالت پایه مشخص می شود که بازه انرژی و انرژی به ترتیب به مقدار ۱۵/۰۷٪ و ۱۱/۰۴٪ بهبود یافته است که نشان از اثر مثبت ماده تغییر فاز دهنده و متخلخل بر بهره وری آب شیرین کن است. این بهبود چشمگیر عملکرد را می توان به دلیل تولید آب شیرین در طی فرایند تخلیه دشارژ ماده تغییر فاز دهنده توجیه کرد.



شکل ۶) دمای آب و سطح جاذب

بهره وری کل سیستم در یک شبانه روز، با استفاده از میزان کل آب شیرین تولید شده قابل تفسیر است. مقدار کل آب شیرین تولید شده برای حالت های مختلف، در شکل ۷ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج، دریافت می شود که مقدار کل تولید آب شیرین برای حالت های حضور همزمان ماده متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده، ماده تغییر فاز دهنده و ماده متخلخل به تنهایی نسبت به حالت پایه، به ترتیب به مقدار ۲۳/۷۳٪، ۱۷/۸۸٪ و ۶/۱۷٪ بیشتر است. قابل ذکر است، در صورتیکه فقط فرایند شارژ در نظر گرفته شود، تولید آب شیرین برای حالت های حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده نسبت به حالت پایه به مقدار ۵٪ بیشتر بوده درحالیکه در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به تنهایی، تولید آب شیرین به مقدار ۰/۸۳٪ نسبت به حالت پایه کمتر شده است. در واقع، مقداری از انرژی گرمایی خورشید صرف تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده از حالت جامد به مایع شده و توسط آب جذب نمی شود. به همین دلیل، تولید آب شیرین در حالت وجود ماده تغییر فاز دهنده به تنهایی در فرایند شارژ، نسبت به حالت پایه کمتر می باشد. با توجه به مقادیر تولید کل آب شیرین، تأثیر مثبت ماده تغییر فاز دهنده در بهبود بهره وری آب شیرین کن، مشهود است. این بهبود عملکرد بدلیل تولید آب شیرین در فرایند دشارژ ماده تغییر فاز دهنده می باشد.

به منظور بررسی دقیق تر عملکرد آب شیرین کن، مقدار بازه ساعتی انرژی و انرژی برای حالت های مختلف به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ نوشته شده اند. نتایج نشان می دهد که حضور ماده تغییر فاز دهنده و متخلخل تأثیر مثبتی بر بازه انرژی و انرژی دارد. به عنوان مثال مقدار بازه انرژی در ساعت ۱۴ برای حالت های حضور همزمان ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده، ماده تغییر فاز دهنده، ماده متخلخل و پایه به ترتیب برابر با ۶۱/۸۳٪، ۵۸/۳۲٪، ۶۱/۸۳٪ و ۵۸/۳۲٪ هستند و مقدار بازه انرژی برای همین حالت به ترتیب ۴/۲۶٪، ۳/۸۵٪، ۴/۳۳٪ و ۳/۹۰٪ می باشد. به طور کلی با مقایسه بازه انرژی می توان دریافت که با حضور ماده متخلخل، میزان تولید آب شیرین بیشتر شده و در نتیجه میزان بازه نیز افزایش می یابد.

فهرست علائم

A_p	مساحت صفحه جاذب (m^2)
c	ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت ($J/kg \cdot ^\circ C$)
h	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
l	تشعشع خورشید (W/m^2)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W/m \cdot ^\circ C$)
L	انتالپی تغییر فاز (kJ/kg)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
MAE	میانگین خطای مطلق
P	فشار ($mmHg$)
Q	نرخ انتقال حرارت (W)
R	ضریب بازتاب
$RMSE$	جزر میانگین مربعات خطا
t	زمان (s)
T	دما ($^\circ C$)
U_b	ضریب اتلاف کلکتور ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
V	سرعت (m/s)
X	ضخامت (m)

علائم یونانی

α	ضریب جذب
ε	ضریب صدور

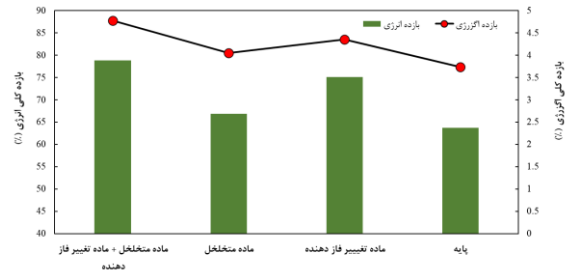
زیرنویس‌ها

cga	جابجایی بین شیشه و محیط
cwg	جابجایی بین آب و شیشه
ewg	تبخیر بین آب و شیشه
g	شیشه
rga	تشعشع بین شیشه و آسمان
rwg	تشعشع بین آب و شیشه
l	مایع
m	ذوب
p	صفحه جاذب
pcm	ماده تغییر فاز دهنده
s	جامد
w	آب

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.



شکل ۸) بازده کلی انرژی و انرژی برای حالت‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، به مدلسازی ریاضی اثر استفاده از مواد متخلخل و ماده تغییر فاز دهنده بر تولید آب شیرین و شیرین و هوایی انرژی یک آب شیرین‌کن خورشیدی تحت شرایط آب و هوایی دزفول پرداخته شد. شبیه‌سازی در چهار حالت شامل پایه، با ماده متخلخل، با ماده تغییر فاز دهنده و حضور همزمان ماده تغییر فاز دهنده و ماده متخلخل انجام شد. با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج تجربی، اعتبار کد محاسباتی توسعه داده شده، تأیید گردید. مهمترین نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر بدین شرح حاصل گردید:

- ۱- بیشترین میزان تولید آب شیرین در ساعت ۱۴ بدست می‌آید که حدوداً برابر با $1/6 \text{ kg/hr}$ است.
- ۲- تولید آب شیرین در حالت ماده متخلخل، ماده تغییر فاز دهنده و حضور همزمان ماده تغییر فاز دهنده و ماده متخلخل به ترتیب به مقدار $17/11\%$ ، $17/88\%$ و $23/72\%$ بیشتر از حالت پایه بود.
- ۳- بازده کلی انرژی و انرژی برای حالت استفاده همزمان از ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده به ترتیب به مقدار $15/07\%$ و $1/04\%$ ، حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به تنهایی به ترتیب به مقدار $11/4\%$ و $0/62\%$ و حالت استفاده از ماده متخلخل به تنهایی به ترتیب به مقدار $3/15\%$ و $0/32\%$ بیشتر از حالت پایه بدست آمد.
- ۴- دمای سطح جاذب و آب با حضور ماده متخلخل و تغییر فاز دهنده نسبت به حالت پایه، بیشتر خواهد شد.

به منظور بررسی‌های بیشتر پیشنهاد میشود، موضوعات زیر مورد توجه محققین آتی باشد:

- ۱- انجام آنالیز اقتصادی سیستم آب شیرین خورشیدی با بکارگیری مواد ماده تغییر فاز دهنده و متخلخل.
- ۲- ترکیب آب شیرین کن با سیستم فتوولتائیک و بررسی عملکرد آن.
- ۳- بررسی تأثیر استفاده همزمان از پارچه‌های پشمی و نانو ذرات در آب موجود در حوضچه و تأثیر آن بر میزان آب تولیدی.

phase change material. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022 Dec 21;44(4):8679-93.

14- Hussain F, Shaik S, Khan SA, Van Huynh V, Jilte RD, Sundara V, Asif M, Linul E. Transient solidification and melting numerical simulation of lauric acid PCM filled stepped solar still basin used in water desalination process. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023 Sep 1;49:103370.

15- Bady M, Attia ME, Elazab MA. Enhancing conical solar still performance using high conductive hollow cylindrical copper fins embedded by PCM. *Solar Energy*. 2024 Nov 1;282:112990.

16- Murali G, Mayilsamy K, Arjunan TV. An experimental study of PCM-incorporated thermosyphon solar water heating system. *International Journal of Green Energy*. 2015 Sep 2;12(9):978-86.

17- Matrawy KK, Alosaimy AS, Mahrous AF. Modeling and experimental study of a corrugated wick type solar still: comparative study with a simple basin type. *Energy conversion and management*. 2015 Nov 15;105:1261-8.

18- Jobrane M, Kopmeier A, Kahn A, Cauchie HM, Kharroubi A, Penny C. Theoretical and experimental investigation on a novel design of wick type solar still for sustainable freshwater production. *Applied Thermal Engineering*. 2022 Jan 5;200:117648.

19- El-Sebaï AA, Al-Ghamdi AA, Al-Hazmi FS, Faidah AS. Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium. *Applied Energy*. 2009 Jul 1;86(7-8):1187-95.

20- Agrawal A, Rana RS, Srivastava PK. Heat transfer coefficients and productivity of a single slope single basin solar still in Indian climatic condition: Experimental and theoretical comparison. *Resource-Efficient Technologies*. 2017 Dec 1;3(4):466-82.

21- Gaur MK, Tiwari GN. Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still. *Applied Energy*. 2010 May 1;87(5):1763-72.

22- Setareh M, Assari MR, Basirat Tabrizi H, Alizadeh M. Performance of a stepped solar still using porous materials experimentally. *Environment, Development and Sustainability*. 2024 Nov;26(11):28519-38.

23- Nakade A, Aglawe A, More K, Kalbande VP. Experimental analysis of two stage solar still integrated with thermal storage based solar collector using nano-enhanced phase change materials. *Desalination and Water Treatment*. 2024 Oct 1;320:100755.

۲۴- ستاره، عساری، بصیرت تبریزی، سلیمانی عویضی، عادل.

بررسی تجربی و آنالیز انرژی و آگرژی آب شیرین کن صفحه تخت در شیب‌های مختلف با استفاده از مواد متخلخل و روغن جاذب حرارت. *مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*.

Apr 21;53(1):141-5.۲۰۲۳

1- Beik AJ, Assari MR, Tabrizi HB. Passive and active performance of a multi-side-stepped square pyramid solar still; experimental and modeling. *Journal of Energy Storage*. 2020 Dec 1;32:101832.

2- Sangeetha A, Shanmugan S, Alrubaie AJ, Jaber MM, Panchal H, Attia ME, Elsheikh AH, Mevada D, Essa FA. A review on PCM and nanofluid for various productivity enhancement methods for double slope solar still: Future challenge and current water issues. *Desalination*. 2023 Apr 1;551:116367.

3- Kasaiean A, Nazari NS, Masoumi A, Shabestari ST, Jadidi M, Fereidooni L, Bidhendi ME. A review on phase change materials in different types of solar stills. *Journal of Energy Storage*. 2024 Oct 10;99:113430.

4- Sivasankar D, Subramani S, Murugan DK. Performance enhancement of single basin solar still using a composite vertical wick configuration. *Desalination and Water Treatment*. 2023 Jan 1;282:80-5.

5- Khan Y, Said Z, Raman R, Singh P, Mehdi Rashidi M, Caliskan H, Garg A. Improving single-slope passive solar still efficiency through integration of phase change materials and Al₂O₃ nanoparticles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024 Aug 22:1-0.

6- Gupta S, Solanki SC. Enhancing the performance of double-slope solar still using nano-enhanced eutectic phase change materials and steel wool fibre as wick material. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024 May;46(5):274.

7- Elamy MI, Mohammed SA, Basem A, Alawee WH, Abdullah AS, Aldabesh A, Majdi HS, Omara ZM, Essa FA. Enhancing coiled solar still performance with vertical wick distiller, reflectors, nanomaterial-infused PCM, and condenser integration. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024 Sep 1;61:104912.

8- Elamy MI, Mohammed SA, Basem A, Alawee WH, Aldabesh A, Abdullah AS, Majdi HS, Omara ZM, Essa FA. Augmenting thermal performance in tubular solar stills: A multifaceted strategy with wick cords, integrated baffles, reflectors, and nano-PCM. *Results in Engineering*. 2024 Sep 1;23:102771.

9- Sharma P, Birla SK. Simulation and experimental analysis of PCM-enhanced solar stills using CMS. *Journal of Energy Storage*. 2024 Dec 1;103:114318.

10- Younes MM, Omara ZM, Amro MI, Hamisa G. Employing a vertical wick, reflector, and Nano phase change material to improve the thermo-economic performance of a tubular solar still. *Journal of Energy Storage*. 2023 Dec 25;74:109362.

11- Afolabi LO, Enweremadu CC, Kareem MW, Arogundade AI, Irshad K, Islam S, Oladosu KO, Elfaghi AM, Didane DH. Experimental investigation of double slope solar still integrated with PCM nanoadditives microencapsulated thermal energy storage. *Desalination*. 2023 May 1;553:116477.

12- Anika UA, Kibria MG, Kanka SD, Mohtasim MS, Paul UK, Das BK. Exergy, exergo-economic, environmental and sustainability analysis of pyramid solar still integrated hybrid nano-PCM, black sand, and sponge. *Solar Energy*. 2024 May 15;274:112559.

13- Shajahan MI, Narayana DR, Radha Krishnan NS, Michael JJ. Evaluation of efficiency of double slope solar still and drinking water yield using silver nanoparticle mixed with