

Assessment of a Hybrid Renewable Energy Solution for Arid Regions: Integration of Photovoltaic-Thermal, Distillation, and Thermoelectric Systems (VMED-PVT-TC)

M.H Kamyab¹, A.A. Abbasian Arani², S. Esfandeh³

¹PhD student, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, Email :mohammadhkamyab@gmail.com

² Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran Email: m.h.kamyab@grad.kashanu.ac.ir

³Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran Email: saeedesfandeh.uk@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 April 2025

Received in revised form: 19 July 2025

Accepted: 03 August 2025

Available online: 01 September 2025

Keywords:

Solar energy, Hybrid system, Desalination, Thermoelectric, Photovoltaic-thermal (PV/T).

ABSTRACT

Given the increasing challenges in providing fresh water in remote and arid regions, the use of solar distillation systems, particularly in combination with modern technologies, has gained attention as a sustainable approach. Although vertical multi-effect diffusion solar stills (VMED) are widely used due to their simple design, high efficiency, and good water quality, optimizing their energy consumption and improving their productivity remains a challenge. In this context, the existing research gap pertains to the loss of thermal energy and the lack of effective integrated approaches for its recovery. This study aims to enhance the efficiency of solar-thermal desalination systems by analyzing the performance of a hybrid system consisting of photovoltaic-thermal (PV/T) panels, thermoelectric modules, and a vertical multi-effect diffusion distillation unit. In the system design, PV/T panels are responsible for simultaneously supplying electrical and thermal energy, while thermoelectric modules are used for cooling and reducing the temperature of the condensation plate, which directly affects freshwater production. Performance evaluation of the system indicates a maximum freshwater production of 2.5 liters in 8760 hours. Over a year, the use of the thermoelectric effect on the distillation unit increases the system's freshwater production efficiency by 23%. Additionally, it was found that the thermoelectric cooler performs better at lower temperatures, as it can reduce the outlet air temperature below the dew point. The maximum moisture removed by the thermoelectric cooler was 0.035 kg in 8600 hours.

Cite this article: Kamyab M.H , Abbasian Arani A.A , Esfandeh S. Assessment of a Hybrid Renewable Energy Solution for Arid Regions: Integration of Photovoltaic-Thermal, Distillation, and Thermoelectric Systems (VMED-PVT-TC) . Fluid Mechanics and Aerodynamics.2025; 14(1):61-80. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.9.2>



Publisher: Imam Hossein University

© The Author(s)

Extended Abstract

Introduction and Problem Statement

The escalating global water scarcity crisis, particularly in arid and remote regions, underscores the urgent need for sustainable and off-grid desalination solutions. Solar-driven desalination technologies present a promising avenue, with the Vertical Multi-Effect Diffusion (VMED) still standing out for its compact structure and inherent multi-stage efficiency. However, the widespread adoption of conventional VMED systems is hampered by significant thermal losses and suboptimal energy recovery, which curtail overall productivity and freshwater yield. To overcome these limitations, this research explores a synergistic approach by developing a hybrid renewable energy system. This study posits that the integration of complementary technologies—specifically, Photovoltaic-Thermal (PV/T) collectors for co-generation and Thermoelectric (TE) modules for active condensation enhancement—can create a significant leap in the performance of solar desalination.

Research Objectives and Novelty

This study is designed with the primary objective of designing, simulating, and evaluating a novel hybrid desalination system: the VMED–PVT–TC system. The specific goals are:

- To synergistically combine a VMED distillation unit with PV/T panels and Thermoelectric Coolers (TECs).
- To quantitatively assess the system's thermal performance, freshwater productivity, and energy utilization efficiency.
- To isolate and analyze the specific contribution of the thermoelectric cooling mechanism in boosting condensation rates.

The key novelty of this work lies in the strategic integration of TE modules directly onto the condensation surface of the VMED unit, a design aimed at actively controlling the condensation temperature—a critical factor often left passive in traditional systems.

Methodology and System Design

A comprehensive model of the hybrid VMED–PVT–TC system was developed and simulated under typical operational conditions over a full annual cycle (8760 hours). The system architecture operates on a multi-loop energy harvest principle:

- **The PV/T Panels:** Simultaneously generate electricity to power the thermoelectric modules and provide low-grade thermal energy to the first effect of the VMED unit, acting as the primary heat source.
- **The Thermoelectric Modules:** Positioned on the condensation plate, they utilize a portion of the PV-generated electricity to actively cool the surface. This Peltier-effect cooling depresses the plate temperature decisively below the dew point, creating a more significant thermal driving force for vapor condensation.
- **The VMED Unit:** Utilizes the thermal input from the PV/T to produce vapor. This vapor diffuses vertically through the effects, condensing and pre-heating the feed seawater in each stage, thereby recovering latent heat. The active cooling from the TECs intensifies this condensation process across the unit.

Key Findings and Achievements

The simulation results demonstrated a marked performance improvement attributable to the hybrid design:

- **Enhanced Condensation:** The thermoelectric effect was identified as a critical performance driver. It consistently maintained the condensation plate at a lower temperature, leading to a faster and more complete phase change of vapor, even during periods of lower solar irradiance.
- **Increased Productivity:** The system achieved a total annual freshwater production of **2.5 liters**.
- **Significant Efficiency Gain:** The incorporation of thermoelectric modules resulted in an **approximately 23% increase in annual freshwater production efficiency** compared to a baseline PV/T-VMED system without TE assistance.
- **Superior Energy Management:** The system successfully demonstrated efficient waste heat recovery from the PV/T panels and a reduction in overall thermal losses, creating a more closed-loop and efficient energy ecosystem.

Conclusion and Implications

This study conclusively demonstrates that the integration of thermoelectric modules with a PV/T-assisted VMED distillation system presents a highly effective strategy for performance enhancement. The proposed VMED–PVT–TC hybrid system not only significantly boosts freshwater yield but also improves operational stability and adaptability to varying environmental conditions. By efficiently utilizing both the electrical and thermal output of solar energy and actively controlling the condensation process, this design offers a sustainable, robust, and highly efficient solution for decentralized water supply in off-grid, arid communities. It represents a meaningful step forward in the quest for energy-autonomous desalination technologies.

بررسی یک راهکار ترکیبی انرژی تجدید پذیر برای مناطق خشک: ترکیب سامانه‌های فتوولتایی- گرمایی با تقطیر و ترموالکتریک (TC-PVT-VMED)

محمدحسن کامیاب^۱، علی اکبر عباسیان آرائی^{۲*}، سعید اسفنده^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: mohammadhkamyab@gmail.com

^{۲*} استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: m.h.kamyab@grad.kashanu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، خوزستان، ایران. رایانامه: saeedesfandeh.uk@gmail.com

مشخصات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

با توجه به چالش‌های فزاینده در تأمین آب شیرین در مناطق دورافتاده و کم‌آب، استفاده از سامانه‌های تقطیر خورشیدی به‌ویژه در ترکیب با فناوری‌های نوین، به‌عنوان رویکردی پایدار مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه سامانه‌های تقطیر خورشیدی چنداثره انتشار عمودی (VMED) به دلیل طراحی ساده، راندمان بالا و کیفیت مناسب آب تولیدی کاربرد فراوانی یافته‌اند، اما همچنان بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری آن‌ها یک چالش محسوب می‌شود. در این راستا، شکاف تحقیقاتی موجود مربوط به تلف شدن بخشی از انرژی حرارتی و نبود رویکردهای تلفیقی مؤثر برای بازیابی آن است. این پژوهش باهدف افزایش کارایی سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی، به تحلیل عملکرد یک سیستم ترکیبی متشکل از پنل‌های فتوولتائیک-حرارتی (PV/T)، ماژول‌های ترموالکتریک و سامانه تقطیر عمودی چنداثره می‌پردازد. در طراحی سیستم، پنل‌های PV/T وظیفه تأمین هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی را بر عهده‌دارند و ماژول‌های ترموالکتریک به‌منظور خنک‌سازی و کاهش دمای صفحه کند انس که اثر مستقیم بر تولید آب شیرین دارند. ارزیابی عملکرد سیستم نشان می‌دهد حداکثر آب تولیدی در واحد تقطیر ۲/۵ لیتر در ۸۷۶۵ ساعت است. در طول یک سال، استفاده از اثر ترموالکتریک بر بخش تقطیر سامانه موجب افزایش راندمان تولید آب شیرین سیستم تا ۲۳٪ می‌گردد. همچنین مشخص گردید که عملکرد خنک‌کننده ترموالکتریک در دماهای پایین‌تر بهتر است زیرا می‌تواند دمای هوای خروجی را به زیر نقطه شبنم کاهش دهد. بیشترین میزان رطوبت حذف‌شده توسط خنک‌کننده ترموالکتریک ۰,۰۳۵ کیلوگرم در ۸۷۶۵ ساعت بوده است.

کلیدواژه‌ها:

انرژی خورشیدی،
سیستم هیبریدی،
آب شیرین‌کن،
ترموالکتریک،
فتوولتائیک-حرارتی (T/PV).

استناد: کامیاب محمدحسن، عباسیان آرائی علی اکبر، اسفنده سعید. بررسی یک راهکار ترکیبی انرژی تجدیدپذیر برای مناطق خشک: ترکیب سامانه‌های فتوولتایی-

گرمایی با تقطیر و ترموالکتریک (VMED-PVT-TC). مکانیک سیالات و آیرودینامیک. (۱۴۰۴); ۱۴(۱): ۸۰-۶۱.

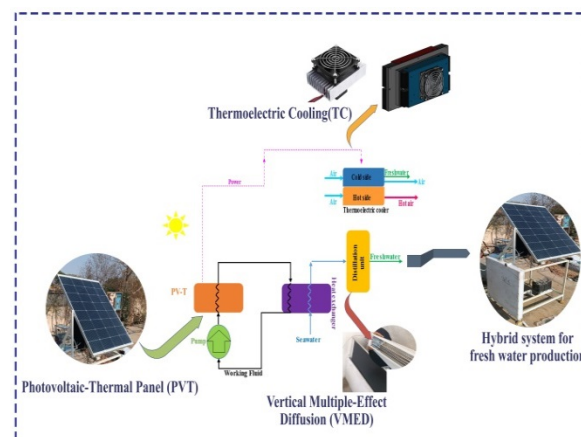
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.9.2>

- فهرست علائم و اختصارات

ورودی گرمایی روزانه به دستگاه	Q_{in}
دمای متوسط روزانه محیط	T_a
سرعت متوسط باد روزانه m/s	V_w
نرخ آب ورودی	f
دمای متوسط آب ورودی	T_f
تعداد اثرها	N
مساحت ماژول m^2	A
ضریب جذب و انتشار پذیری صفحه جاذب ماژول	c
تعداد پوشش‌های شیشه‌ای	n
دمای سیال در گردش در ورودی و خروجی ماژول C°	T
دبی سیال در قسمت سرد و گرم kg/s	Q
تابش خورشیدی W/m^2	S
جریان الکتریکی وارد شده به ترموالکتریک mA	I
ولتاژ کاری خنک‌کننده ترموالکتریک V	v
ضخامت شکاف انتشار mm	L
دمای محیط C°	T_a
بهره‌وری روزانه $kg/m^2/day$	P
شکاف انتشار بین صفحات، شیب روی زمین	θ
نرخ جریان خوراک	\dot{m}_f
راندمان	η
ضریب اتلاف حرارتی	$U_{L/T}$
فاکتور بازدهی کلکتور	F_R
تشعشع کلی	I_T
ظرفیت حرارتی	C_{pf}
نرخ انتقال حرارت سرد	Q_c
نرخ انتقال حرارت گرم	Q_h
جرم محفظه عمودی	M

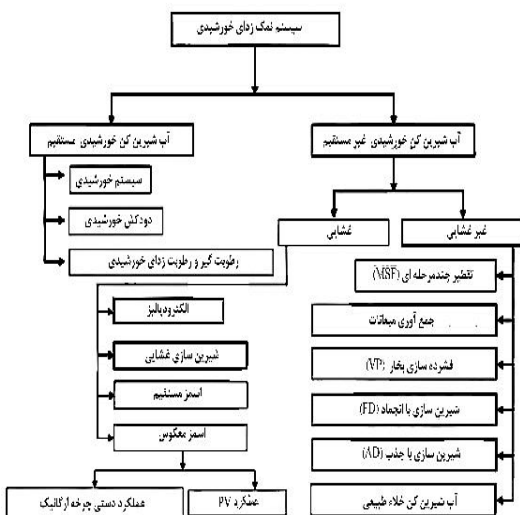
۱- مقدمه

دسترسی به آب شیرین قابل اطمینان نقش بنیادی و چندوجهی در طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های روزمره انسان‌ها ایفا می‌کند. نیاز به این ماده ارزشمند با بهبود و ارتقاء استانداردهای زندگی انسانی و توسعه فناوری‌ها به‌طور پیوسته افزایش یافته است. با توجه به اهمیت حیاتی آب و نیز به دلیل دسترسی وسیع به انرژی خورشیدی در بسیاری از نقاط جهان، تلفیق سامانه‌های نمک‌زدایی آب با انرژی‌های تجدید پذیر یکی از بهترین گزینه‌ها برای تولید آب شیرین به حساب می‌آید. نقش سیستم‌های انرژی تجدید پذیر در شیرین سازی آب، به‌ویژه با استفاده از سیستم‌های هیبریدی در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای منابع آب شیرین در مناطق دورافتاده به موضوعی مهم تبدیل شده است. سیستم‌های هیبریدی که ترکیبی از انرژی‌های تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، و حتی انرژی زمین‌گرمایی هستند می‌توانند کارایی و پایداری فرایندهای شیرین سازی آب را بهبود بخشند. سامانه‌های هیبریدی می‌توانند برای تأمین گرمای موردنیاز برای تولید بخار در کارخانه‌های شیرین سازی حرارتی و برق برای راه‌اندازی پمپ‌های فشارقوی در واحدهای RO و اجزای کمکی در فناوری‌های مختلف شیرین سازی استفاده شوند. هرچند سیستم‌های هیبریدی و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر فرصت‌های بسیاری را برای توسعه شیرین سازی آب ایجاد می‌کنند، اما چالش‌هایی نیز وجود دارد. هزینه‌های اولیه بالای نصب سیستم‌های تجدید پذیر و نیاز به زیرساخت‌های مناسب از جمله این چالش‌ها هستند. با این حال، پیشرفت‌های فناوری و کاهش هزینه‌های تولید انرژی تجدید پذیر در سال‌های اخیر، امکان استفاده گسترده‌تر از این دستگاه‌ها را فراهم آورده است. همچنین، روش‌های گوناگونی برای تولید آب از هوای مرطوب وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به استفاده از مواد جاذب، سامانه‌های تولید آب از رطوبت هوا، روش‌های مکانیکی و استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک اشاره کرد. تأمین انرژی اولیه این روش‌ها برای برداشت آب نیز یک چالش اساسی در مناطق دورافتاده محسوب می‌شود که استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند راهکار مناسبی برای پاسخ به این چالش باشد.



شکل (۱). افزایش بهره‌وری سیستم نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی در ترکیب با ترموالکتریک و سامانه انتشار عمودی چنداثره - مقدمه

می‌توان به دو گروه روش غیرمستقیم حرارتی و روش غیرمستقیم مکانیکی (غشایی) دسته‌بندی کرد. در روش غیرمستقیم حرارتی یک منبع انرژی خارجی به حوضچه یک سیستم شیرین سازی مستقیم جهت افزایش نرخ تبخیر وارد می‌شود؛ این منبع انرژی خارجی می‌تواند متمرکز کننده‌های خورشیدی، انرژی حرارتی اتلافی و یا دیگ‌های بخار موسوم باشد [۴] و [۵]. در روش غیرمستقیم مکانیکی ابتدا انرژی خورشید به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و سپس در فرآیند تصفیه غشایی مورد استفاده قرار گیرد. فناوری‌های نمک‌زدایی خورشیدی که تاکنون ارائه شده است و همچنین ظرفیت و بازده واحدهای نمک‌زدایی که از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند در شکل ۲ آمده است.



شکل (۲): طراحی‌های متنوع برای سیستم‌های تقطیر خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم [۴]

۲-۱- دستگاه های تقطیر خورشیدی مستقیم

چند اثر

دستگاه های تقطیر خورشیدی چند اثر به دلیل استفاده از حداکثر گرمای پراکنده شده، طراحی شده‌اند. در این نوع دستگاه‌ها بیش از یک پوشش شیشه‌ای بر روی سطح آب است؛ بنابراین از گرمای نهان تقطیر شدن برای افزایش بازده حرارتی دستگاه تقطیر خورشیدی استفاده می‌شود. بازده این نوع دستگاه‌ها بیشتر از دستگاه‌های تقطیر خورشیدی غیرفعال تک اثر است [۶]. شما تیکی از دستگاه تقطیر خورشیدی غیرفعال چند اثر در شکل (۳) آمده است.

روش‌های مرسوم نمک‌زدایی حرارتی، با مصرف انرژی بالا و هزینه‌های عملیاتی سنگین، در تقابل با اهداف توسعه پایدار قرار گرفته‌اند. این چالش‌ها، ضرورت تحول در پارادایم فناوری‌های شیرین سازی آب را آشکار ساخته‌اند. امروزه، تلفیق انرژی‌های تجدید پذیر با فرآیندهای نمک‌زدایی، نه تنها راهکاری برای بحران آب، بلکه پاسخی یکپارچه به مثلث چالش‌برانگیز «آب-انرژی-محیط‌زیست» است. در مناطق گرم و خشک، سامانه‌های تقطیر خورشیدی چنداثره (MED) با مزایایی چون کیفیت مطلوب آب تولیدی، طراحی ساده و قابلیت استقرار در مقیاس‌های مختلف، به‌ویژه برای مصارف کشاورزی و شرب، به انتخابی راهبردی تبدیل شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که بازده این سیستم‌ها در شرایط بهینه به ۷۰٪ نیز می‌رسد [۱].

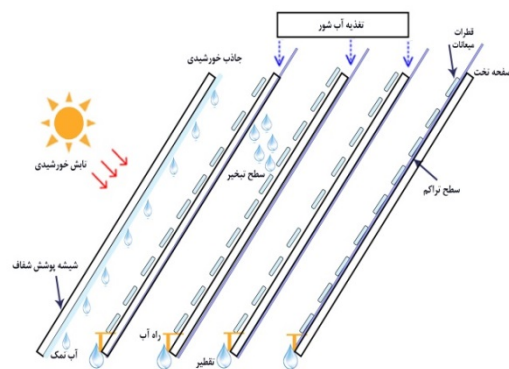
ادغام انرژی خورشیدی و بادی در چارچوب سیستم‌های هیبریدی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و بازده حرارتی را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد [۲]. این رویکرد، به‌ویژه برای مناطق دورافتاده با تابش خورشیدی بالا، راه‌حلی اقتصادی و پایدار ارائه می‌کند. پیوند سامانه‌های تقطیر با خنک‌کننده‌های ترموالکتریک، نمونه‌ای نوآورانه از کاهش ردپای کربن است. این فناوری با بازیابی حرارت تلف شده، نه تنها مصرف انرژی را تا ۲۰٪ کاهش می‌دهد، بلکه از تخلیه شورابه‌های گرم به محیط نیز جلوگیری می‌کند. [۳]

راهبردهای هیبریدی (ترکیب تقطیر خورشیدی و استحصال آب از هوا) امروزه به‌عنوان پارادایمی جامع در مدیریت پایدار منابع آب مطرح هستند. این فناوری‌ها، علاوه بر حل چالش‌های فوری، چارچوبی برای سیاست‌گذاری‌های کلان در حوزه آب و انرژی ارائه می‌دهند.

۱-۱- نمک‌زدایی خورشیدی^۱

نمک‌زدایی خورشیدی، یک فناوری نمک‌زدایی بشور و تهیه آب قابل شرب با استفاده از انرژی خورشید است. دو روش اساسی برای انجام نمک‌زدایی به نام‌های روش مستقیم و روش غیرمستقیم وجود دارد. در روش مستقیم انرژی نور خورشید به‌طور مستقیم به‌عنوان حرارت برای فرآیند تبخیر آب موجود در حوضچه به‌منظور نمک‌زدایی استفاده می‌شود. روش شیرین سازی غیرمستقیم را

[۱۰] ۲۰۰۱	۲۵	آزمایش در زمان واقعی	برزیل	گردآورنده تخت خورشیدی	هفت اثر تقطیری
[۱۱] ۲۰۱۳	۷.۱۰	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و آزمایش در زمان واقعی	چین	گردآورنده لوله خلأ	سه اثر تقطیری
[۱۲] ۱۹۹۸	۸.۱۲	آزمایش در زمان واقعی	ژاپن	گردآورنده تخت خورشیدی	سه اثر تقطیری خلأ
[۱۳] ۲۰۰۰	۹	مدل‌سازی عددی در حالت پایا	خاورمیانه	گردآورنده تخت خورشیدی	سه اثر تقطیری خلأ
[۱۴] ۲۰۰۹	۱۷	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و آزمایش در زمان واقعی	مالزی	گردآورنده تخت خورشیدی	سه اثر تقطیری خلأ
[۱۵] ۲۰۱۲	۴.۱۷	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت	هند	گردآورنده تخت خورشیدی	چند اثر نمک‌زدایی خلأ
[۱۶] ۱۹۸۹	۴.۱۵	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت	ژاپن	حالت غیرفعال	چند اثر انتشار عمودی با حوضچه
[۱۷] ۲۰۰۰	۳.۱۳	آزمایش در زمان واقعی	ژاپن	آینه‌های تخت	چند اثر انتشار عمودی
[۱۸] ۲۰۰۴	۸.۲۱	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت	ژاپن	گردآورنده خورشیدی لوله گرمایی	چند اثر انتشار عمودی
[۱۹] ۲۰۱۰	۲۰	مدل‌سازی عددی حالت پایا	ژاپن	ژنراتور الکتریکی	چند اثر انتشار عمودی
[۲۰] ۱۹۸۷	۴	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و آزمایش در زمان واقعی	تایلند	گردآورنده تخت خورشیدی	چند اثر انتشار عمودی
[۲۱] ۲۰۲۱	۳۲	شبیه‌سازی دینامیکی + آزمایش میدانی	امارات	گردآورنده لوله خلأ + پنل فتوولتائیک	چند اثر هیبریدی (MED-TVC)
[۲۲] ۲۰۲۰	۲۴.۳	آنالیز اکس رژی + آزمایش میدانی	آمریکا	گردآورنده سهموی خطی (PTC)	سه اثر تقطیری نانوفیلتراسیون
[۲۳] ۲۰۲۲	۲۸.۵	مدل‌سازی CFD. آزمایش میدانی	ایسلند	گرمایش ژئوترمال	پنج اثر تقطیری با بازیابی حرارت
[۲۴] ۲۰۲۲	۳۰.۸	مدل‌سازی ترموآکونوم پیک	استرالیا	هیبرید خورشیدی-شیکه	چند اثره غشایی اسمز معکوس (MED-RO)
[۲۵] ۲۰۲۳	۲۴/۵	مدل‌سازی عددی + آزمایش	عربستان سعودی	گردآورنده سهموی + جاذب‌های پیشرفته	ADS-MED هیبریدی
[۲۶] ۲۰۲۳	۳۱.۴	شبیه‌سازی دینامیکی	اسپانیا	مخزن نمک مذاب	MED با ذخیره‌سازی حرارتی
[۲۷] ۲۰۲۲	۳۳.۱	آزمایش میدانی	مراکش	کلکتورهای متمرکز	MED با پیش‌حرارت خورشیدی



شکل (۳): دستگاه تقطیر خورشیدی غیرفعال چند اثر
دستگاه تقطیر خورشیدی با انتشار چند اثر عمودی
برای تصفیه آب از طریق چندین مرحله تبخیر و تراکم
طراحی شده است. اجزای آن به شرح زیر است

جدول (۱): ویژگی‌های دستگاه تقطیر خورشیدی

مؤلفه	توضیحات	مزایا	چالش‌ها
نیاز به ساختار مستحکم - هزینه ساخت بالاتر نسبت به مدل‌های افقی	- صرفه‌جویی در فضا - جذب بهتر انرژی خورشیدی - کاهش تلفات حرارتی جانبی	سیستم به‌صورت عمودی ساخته شده است تا از فضای کمتری استفاده کند و نور خورشید را به‌صورت متمرکز جذب نماید.	طراحی عمودی
پیچیدگی طراحی - نیاز به عایق‌بندی مناسب برای جلوگیری از اتلاف حرارت	- افزایش راندمان (تا ۵ برابر بیشتر از سیستم‌های تک‌مرحله‌ای) - استفاده مجدد از گرمای پنهان تبخیر - تولید آب شیرین بیشتر در روز	شامل چندین مرحله تبخیر و تراکم است که در هر مرحله، بشور گرم شده و بخار تولید می‌شود. سپس بخار در سطح بعدی تقطیر شده و آب شیرین تولید می‌کند.	چند اثر (مرحله‌ای)
وابستگی به شرایط آب‌وهوایی (سرعت باد، رطوبت) - نیاز به تنظیم دقیق فاصله بین مراحل	بهبود انتقال حرارت - کاهش نیاز به پمپ‌های کمکی در برخی طراحی‌ها - افزایش راندمان کلی	حرکت طبیعی یا اجباری بخار و گرما بین مراحل مختلف، که باعث انتقال مؤثرتر انرژی می‌شود.	انتشار (Diffusion)

جدول (۲): خلاصه‌ای از انواع سامانه‌های تقطیری چند

اثر کوچک

نوع سامانه	نوع منبع گرمایی	مکان	نوع بررسی	بازدهی (-۲m/kg) (d)	سال تحقیق
حوضچه ای سه اثر فعال	گردآورنده تخت خورشیدی	هند	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت	۱۲	[۷] ۱۹۹۹
چند اثر جمع‌ی	گردآورنده تخت خورشیدی	هند	مدل‌سازی عددی انتقال حرارت	۷.۶	[۸] ۱۹۹۳
چهار اثر تقطیری	گردآورنده لوله خلأ	خاورمیانه	آزمایش‌های محیطی داخل	۱۱	[۹] ۲۰۱۰

آب همراه بوده‌اند. از نخستین این پژوهش‌ها توسط الشربینی^۱ و فاث^۲ تحت شرایط آب و هوایی اسکندریه، مصر مورد بررسی قرار گرفت در این مطالعه تمام زوایای شیب بین موقعیت‌های افقی و عمودی در طول سال مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر فاصله شکاف هوا، ضخامت عایق، جریان آب تغذیه و سرعت باد بر عملکرد روزانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که بهره‌وری روزانه از ۰.۵ تا ۵ کیلوگرم بر مترمربع است و عمدتاً به پارامترهای اقلیمی مانند تابش خورشیدی و دمای هوا بستگی دارد. آن‌ها همچنین ادعا کردند که عملکرد روزانه با ضخامت عایق رابطه مستقیم و با فاصله شکاف و دبی آب تغذیه رابطه معکوس دارد [۲۹]. السبای^۳ یک مدل ریاضی گذرا را برای بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی برای یک روز آفتابی معمولی در تاننا واقع در مصر پیشنهاد کرد. از نتایج، این نتیجه حاصل شد که تقطیر روزانه با رشد طول، عرض و سرعت باد تا سطح معینی از هر پارامتر افزایش می‌یابد. آن‌ها بازده روزانه ۲۹ درصد را گزارش کردند و به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری روزانه از دستگاه با افزایش فاصله بین جاذب و پوشش شیشه‌ای کاهش می‌یابد و با افزایش ضخامت آب جاری کاهش می‌یابد [۳۰]. ادامه تحقیقات پژوهشگران در حوزه بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی چنداثره این موضوع را ثابت کرد که می‌توان از گرمای نهان حاصل از چگالش بخار روی شیشه برای تبخیر بشور در یک مرحله دیگر نیز استفاده کرد. بدین ترتیب آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی چنداثره معرفی شد. در این راستا، عملکرد نظری یک آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی چنداثره فعال در طول سال توسط ردی^۴ و شارون^۵ انجام شد. آن‌ها تعداد بهینه اثرات، سرعت جریان جرمی و شکاف تقسیم را به ترتیب ۵، ۲.۷ کیلوگرم در ساعت و ۰.۵ متر گزارش کردند. حداکثر میانگین بهره‌وری سالانه نیز ۶/۷۸ و ۲۱/۲۹ کیلوگرم بر مترمربع در روز برای واحد بهینه‌سازی شده در حالت کارکرد عادی و خلأ به دست آمد [۳۱]. رفتار دینامیکی یک آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی چنداثره توسط محققان

درمیان انواع آب‌شیرین‌کن‌های تقطیری چند اثر خورشیدی نوع انتشار عمودی، عملکرد بهتری از نظر بهره‌وری و کیفیت آب تقطیر شده را نشان داده است. علت اصلی این موضوع این است که در نوع چند اثر انتشار عمودی آب‌شیرین‌کن تقطیری خورشیدی، شانس اختلاط آب خوراک (بشور) با آب تقطیر شده (آب شیرین) بسیار پایین است. این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند. (جدول ۳)

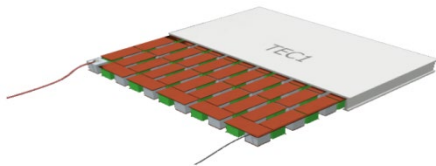
جدول (۳): دسته‌بندی انواع سامانه‌های انتشار عمودی [۲۸]

کلی	نوع	منبع گرمایی	تعداد اثر	توضیحات
انتشار عمودی	فعال	خورشید و سایر منابع گرمایی	تک اثر و چند اثر	به کمک یک پمپ و گردش سیال اجباری
	غیرفعال	تابش مستقیم خورشید	تک اثر و چند اثر	فقط تابش مستقیم خورشید

آب‌شیرین‌کن تقطیری خورشیدی چند اثر انتشار عمودی از آرایش چندگانه صفحات تشکیل شده که در آن تعدادی صفحه عمودی به موازات یکدیگر، با وجود شکاف کوچکی بین صفحات تشکیل شده است. هر صفحه عمودی از یک طرف با یکپارچه متخلخل پوشیده شده است. گرمابه اولین صفحه آرایش چندصفحه‌ای عرضه می‌شود و آب خوراک خام به طور مداوم به هر یک از سطوح پوشیده شده با پارچه صفحات تغذیه می‌شود. گرمای وارد شده به صفحه اول بخارات آب را از پارچه آغشته به آب متصل به طرف دیگر صفحه تولید می‌کند. این بخارات آب از طریق شکاف باریک بین صفحات پخش می‌شود و در سطح بدون پوشش صفحه دوم چگالیده می‌شود. گرمای نهان چگالش آزاد شده توسط بخارات چگالیده شده از طریق صفحه عبور می‌کند و بخار آب را از طرف پارچه‌ای پوشیده شده از صفحه دوم تولید می‌کند. به این ترتیب انرژی گرمایی عرضه شده به صفحه اول چندین بار برای افزایش بهره‌وری مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد [۲۸].

تاکنون تحقیق‌های زیادی بر روی آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی به صورت تجربی و عددی صورت گرفته است. عموم این تحقیق‌ها با هدف افزایش بهره‌وری آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی صورت گرفته‌اند و عموماً با معرفی پارامترهایی حساس و مؤثر و یافتن مقدار بهینه

یا غیرفعال طبقه‌بندی کرد. روش فعال، مانند خنک کردن، شامل یک منبع انرژی خارجی است که اغلب از مدارهای خنک‌کننده و خنک‌کننده‌ها استفاده می‌کند. خنک‌کننده‌های ترموالکتریک (TEC) یک جایگزین مبتنی بر الکتروسیسته ارائه می‌کنند و از اثر پلنتیه برای انتقال حرارت استفاده می‌کنند. درحالی‌که فرآیندهای مبتنی بر TEC ممکن است انرژی کمتری داشته باشند، مزایای عملی آن‌ها شامل عدم گردش سیال، حداقل تجهیزات مکانیکی، نیازهای تعمیر و نگهداری کم و قابلیت حمل است. تحقیقات اخیر بر روی فناوری خنک‌کننده ترموالکتریک برای یک واحد تولید آب قابل حمل متمرکز شده است [۳۳-۳۵].



شکل (۴): نمایی از ترموالکتریک مورد استفاده در

این پژوهش

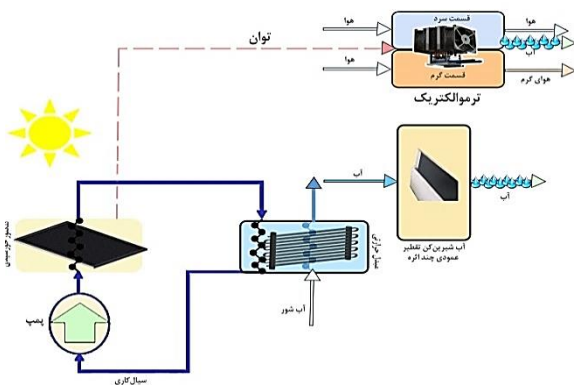
جوشی و همکاران [۳۶] نمونه اولیه واحد تولید آب ۶ کیلوگرمی را با استفاده از خنک‌کننده ترموالکتریک، ارزیابی نرخ جریان جرمی، جریان الکتریکی و رطوبت روی آب متراکم آزمایش کرد. آزمایش‌های در دمای ثابت ۳۰ درجه سانتی‌گراد رابطه مستقیمی را بین جریان هوا، رطوبت و جریان نشان داد. لئو و همکاران [۳۷] یک واحد نمک‌زدایی ۷ کیلوگرمی با ماژول‌های ترموالکتریک دوگانه را مطالعه کردند و دریافتند که رطوبت هوای ورودی بالاتر تولید آب را افزایش می‌دهد. تأثیر سرعت جریان حجمی بر روی آب متراکم شده در ابتدا متفاوت بود، اما پس از ۸ ساعت تثبیت شد، با نرخ‌های بالاتر منجر به افزایش آب متراکم به دلیل کاهش دمای باله شد. شارون و همکاران [۳۸] در تحقیقات خود به ادغام یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی چنداثره با ترموالکتریک به منظور بهبود عملکرد آن پرداختند، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک (TEC) در کنار آب‌شیرین‌کن خورشیدی چنداثره می‌تواند بازدهی را تا ۳۰٪ افزایش دهد، زیرا ترموالکتریک به بازایی گرمای تلف‌شده کمک می‌کند. کابیل و همکاران [۳۹] در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های چنداثره عمودی با استفاده از ترموالکتریک به مطالعات پرداختند نتایج نشان داد که اضافه کردن

با استفاده از معادلات موازنه گرما و جرم ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تطابق نزدیکی با نتایج به‌دست‌آمده از یک واحد در مقیاس آزمایشگاهی (۵ مرحله با مساحت فریم ۱ مترمربع) و در مقیاس بزرگ‌تر (۱۰ مرحله با مساحت فریم ۳ مترمربع) نشان داد. نتایج تجربی در طول چهار روز معمولی در یک سال نشان داد که آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی پنج اثر بهره‌وری بالاتری در حدود هفت برابر بیشتر از یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی حوضچه‌ای دارد [۳۲].

۳-۱- سامانه‌های هیبریدی

سامانه‌های انتشار عمودی چنداثره به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در نمک‌زدایی شناخته می‌شوند، اما این فناوری با چالش‌هایی از جمله مصرف بالای انرژی و محدودیت‌های اقتصادی مواجه است. این مسائل نه تنها هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهند، بلکه کاربرد گسترده این سامانه‌ها را در مناطق کم منابع و نیازمند به آب شیرین محدود می‌کنند. علاوه بر این، بهره‌وری پایین در استفاده از انرژی و اتلاف حرارتی، نیاز به توسعه و بهبود این فناوری را دوچندان کرده است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب سامانه‌های انتشار عمودی چنداثره با فناوری‌های نوآورانه مانند ماژول‌های ترموالکتریک می‌تواند تأثیر چشمگیری بر کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری داشته باشد. فناوری ترموالکتریک با قابلیت بازایی انرژی حرارتی تلف‌شده و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، نقش مهمی در بهینه‌سازی سامانه‌های نمک‌زدایی ایفا می‌کند. این سیستم‌های ترکیبی، علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی، پایداری بیشتری در عملکرد دارند و به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کنند. تخمین زده می‌شود که هوای جوی حاوی حدود شش تا ده گرم آب شیرین در هر مترمکعب است که منبع امیدوارکننده‌ای برای استخراج آب شیرین است. ژنراتورها برای این منظور به‌طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) آن‌هایی که هوای محیط را در سطح سرد زیر نقطه شبنم خنک می‌کنند، (۲) از خشک‌کن‌های جامد یا مایع برای جمع‌آوری بخار آب استفاده می‌کنند و (۳) از سازه‌های برج مانند استفاده می‌کنند. بسته به استفاده از یک محیط تبدیل انرژی، این روش‌ها را می‌توان بیشتر به‌عنوان فعال

تأمین هم‌زمان برق سیستم ترموالکتریک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، علاوه بر این ماژول‌های ترموالکتریک قادرند با استفاده از اختلاف دما بین قسمت‌های گرم و سرد، انرژی حرارتی اتلاف‌شده را بازیابی کرده و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. و از اتلاف انرژی جلوگیری شود. (شکل ۵)



شکل (۵): نمایی از فرایند سستم ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش

درواقع حرارت ترموالکتریک به منظور پیش‌گرمایش بشور ورودی به دستگاه است و اثربخشی قابل‌توجهی بر سیستم نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی دارد و موجب افزایش بازده کلی سیستم می‌شود. این ترکیب می‌تواند نیاز به منابع انرژی مکمل را به حداقل برساند و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این تحقیق بر اساس شهر کاشان در ایران است. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی کلکتور حرارتی فتوولتائیک در جداول ۴ آمده است.

جدول (۴): پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی کلکتور فتوولتائیک-حرارتی.

۱	تعداد کلکتور	۱	-
۲	مساحت کلکتور	۵	m ²
۳	ضریب راندمان پره کلکتور	۰/۹۶	-
۴	ظرفیت گرمای ویژه سیال	۴/۱۹	kJ/kg K
۵	ضریب جذب صفحه کلکتور	۰/۹	-
۶	شیب کلکتور	۴۵	درجه
۷	ضریب جذب عبوری	۰/۹	-
۸	حالت راندمان	۱	-
۹	نرخ جریان	۴۰	kg/h m ²

ترموالکتریک به سیستم، تولید آب شیرین را تا ۷٫۵ لیتر در روز به ازای هر مترمربع بهبود می‌بخشد. رحمانی و همکاران [۴۰] به مدل‌سازی دینامیکی آب‌شیرین‌کن چنداثره هیبریدی (ترموالکتریک + خورشیدی) پرداختند این مطالعه یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد سیستم هیبریدی ارائه کرد و نشان داد که در شرایط آب‌وهوایی خشک، بازدهی سیستم تا ۴۰٪ افزایش می‌یابد. الشیخ و همکاران [۴۱] به بررسی استفاده از نانو سیالات و ترموالکتریک در آب‌شیرین‌کن‌های چنداثره پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب نانو سیالات و ترموالکتریک می‌تواند بازدهی را تا ۵۰٪ نسبت به سیستم‌های معمولی افزایش دهد. لی و همکاران [۴۲] بررسی اقتصادی و محیط‌زیستی سیستم‌های هیبریدی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که سیستم‌های هیبریدی خورشیدی-ترموالکتریک نه تنها از نظر انرژی کارآمدتر هستند، بلکه از نظر هزینه‌های بلندمدت نیز مقرون به صرفه تر است.

این پژوهش با ارائه یک سامانه هیبریدی نوآورانه متشکل از سه فناوری سامانه تقطیر عمودی چنداثره (VMED)، پنل‌های فتوولتائیک-حرارتی (PV/T) و ماژول‌های ترموالکتریک (TEC)، گامی فراتر از مطالعات پیشین برداشته است. در این سیستم یکپارچه، گرمای تولیدی پنل‌های PV/T هم‌زمان نیاز حرارتی فرآیند تقطیر را تأمین کرده و از طریق ماژول‌های ترموالکتریک، انرژی تلف‌شده بازیابی می‌شود که منجر به افزایش چشمگیر راندمان کلی می‌گردد. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی ترمودینامیکی پیشرفته در محیط TRNSYS، چارچوبی تحلیلی برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم ارائه داده که از دو نوآوری کلیدی برخوردار است: نخست، ترکیب هم‌افزای این فناوری‌ها در یک ساختار یکپارچه، و دوم، توسعه مدلی قابل‌تعمیم برای کاربردهای عملی در مناطق کم‌آب که می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار برای تولید هم‌زمان آب شیرین و برق مورد استفاده قرار گیرد.

۲- سیستم هیبریدی در مطالعه حاضر

افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف آن در فرآیند نمک‌زدایی یک مزیت محسوب می‌گردد. در این ترکیب پیشنهادی، از پنل‌های PV/T (فتوولتائیک-حرارتی) به‌عنوان یک منبع تجدید پذیر و پایدار به‌منظور تأمین گرمای لازم برای فرآیند سامانه تقطیر عمودی چند اثر و

حداقل مصرف انرژی و کمترین اثرات زیست‌محیطی عمل کند. در این راستا، طراحی و تحلیل یک سامانه نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی که با فناوری ترموالکتریک و سامانه انتشار عمودی چنداثره ترکیب شده تا کارایی و بهره‌وری آن مورد بررسی قرار گیرد در این راستا پارامترهای عملکردی مختلف از جمله ورودی تابش خورشید، دمای محیط و تأثیر آن‌ها بر تولید تقطیر مورد تجزیه و تحلیل می‌گیرد. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تنظیم مناسب این پارامترها می‌تواند به بهبود تولید آب شیرین و کاهش مصرف انرژی منجر شود.

نوآوری این پژوهش در ترکیب فناوری ترموالکتریک با سامانه انتشار عمودی چنداثره که با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به‌عنوان منبعی پایدار و تجدید پذیر همراه است، استفاده بهینه از پانل‌های PV/T و طراحی پیشرفته سامانه چنداثره، امکان دستیابی به سیستمی کارآمدتر و پایدارتر را جهت تأمین آب شیرین در مناطق با منابع محدود و توسعه فناوری‌های سبز را فراهم کرده است. تحقیقات متمرکز بر این مسائل می‌تواند منجر به طراحی‌های قوی‌تری شود که می‌توانند در برابر سختی‌های عملیاتی میدانی مقاومت کنند و امکان‌پذیری اقتصادی لازم را برای هر مقدار آب تولیدشده در مناطق دوردست و محروم از آب را فراهم نماید.

۳- مدل‌سازی سیستم

برای تحلیل عملکرد و بهبود کارایی سیستم ترکیبی نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی، مدل‌سازی دقیق اجزای سیستم ضروری است. این سیستم شامل سه بخش اصلی است: سامانه انتشار عمودی چنداثره (VMED)، ماژول‌های ترموالکتریک (TE)، و پانل‌های فتوولتائیک-حرارتی (PV/T). در این بخش، فرآیند مدل‌سازی هر بخش به تفکیک توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی سامانه انتشار عمودی چنداثره (VMED)

مدل‌سازی این سامانه بر اساس اصول انتقال حرارت و جرم صورت گرفته است. در این واحد، بشور از یک منبع ذخیره‌ساز حرارتی پیش گرم شده و سپس از طریق لوله‌ها به واحد نمک‌زدایی جاری می‌شود. پس‌از این مراحل، بشور از طریق چندین مرحله تقطیر و جداسازی میانی خالص شده و به آب تصفیه‌شده تبدیل می‌شود. فرایضی که

پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیستم تقطیر عمودی چند اثر در جدول ۵ آمده است.

جدول (۵): پارامترهای مورد نیاز سیستم تقطیر عمودی چند اثر به منظور شبیه‌سازی [۲۸].

طول و عرض هر محفظه عمودی	۱×۱	m ²
ضخامت محفظه عمودی	۰٫۰۰۱	m
ضریب گسیلندگی آب	۰٫۹۵	-
ضریب گسیلندگی سطح فلز	۰٫۲۲	-
ثابت استفان-بولتزمن	۰٫۰۰۰۰۵	W/ m ² K
فاصله بین سطح تبخیر و میعان	۰٫۰۰۵	m
میزان بازتاب زمین	۰٫۲	درجه
ظرفیت گرمایی ویژه محفظه عمودی	۰٫۴۷۷	kJ/kg.K
زاویه شیب دستگاه تقطیر	۳۰	-
تعداد اثرها	۴-۷	-
سرعت جریان آب‌نمک	۱۸	kg/h m ²
دمای محیط	۲۹۸	K
رطوبت نسبی محیط	۰٫۶	-
دبی جرمی آب‌نمک	۰٫۰۰۵	kg/h m ²
دمای آب‌نمک	۳۲۸٫۶	K
سرعت باد	۱٫۵	m/s
فشار اتمسفر	۱۰۱۳۲۵	Pa

پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک در جداول ۶ آمده است.

جدول (۶): مشخصات مورد نیاز سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک به منظور شبیه‌سازی [۴۴، ۴۳].

۱	دمای محیط	۲۹۸	K
۲	رطوبت نسبی ورودی	۱۵	-
۳	رطوبت نسبی خروجی	۵	-
۴	فشار سیستم	۱۰۱	kpa
۵	جریان جرمی هوا (سنت سرد)	۰٫۰۰۶۶۰۷	kg/s
۶	جریان جرمی هوا (سنت گرم)	۰٫۰۱۱۹۸	kg/s
۷	ضخامت پره (هیئت سینک سرد)	۰٫۰۰۴۱۲	m
۸	ضخامت پره (هیئت سینک گرم)	۰٫۰۰۴۱۸	m

در این پژوهش هدف اصلی این پژوهش، ارائه و ارزیابی سیستمی با کارایی بالا برای تولید آب شیرین است که با

$$(MC)_{Pi} \frac{dT_{Pi}}{dt} = \dot{m}_{fi} C_{pf} T_{co} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{(i-1)-i} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{i-(i+1)} - \dot{m}_{bi} C_{pb} T_{bi} \quad (۲)$$

و همچنین قانون اول ترمودینامیک برای مرحله آخر به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$(MC)_{PN} \frac{dT_{PN}}{dt} = \dot{m}_{fN} C_{pf} T_{co} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{(N-1)-N} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{N-a} - \dot{m}_{bN} C_{pb} T_{bN} \quad (۳)$$

لازم به ذکر است که اندیس a بیانگر محیط بیرون است. انتقال توان حرارتی از طریق مکانیسم جابجایی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$Q_{i-(i+1)} = h_{c(i)} A_p (T_{P(i)} - T_{P(i+1)}) \quad (۴)$$

در این رابطه h_c بیانگر ضریب انتقال حرارت است. A_p بیانگر سطح انتقال حرارت (تبخیر یا چگالش) است.

۲-۳- مدل‌سازی ماژول‌های ترموالکتریک (TE)

عملکرد ماژول‌های ترموالکتریک با استفاده از روابط حرارتی-الکتریکی مدل‌سازی شده است. بر اساس نحوه عملکرد ماژول ترموالکتریک (اثر پل تیر)، با ایجاد اختلاف ولتاژ در آن، دو قطب سرد و گرم تشکیل خواهد شد. به‌طور کلی هر کولر ترموالکتریک چهار مشخص اصلی دارد که عبارت‌اند از جریان ماکزیمم (I_{max}) و ولتاژ ماکزیمم (V_{max}) اختلاف دمای ماکزیمم (ΔT_{max}) و انتقال حرارت ماکزیمم (Q_{max}). قطب گرم کولر ترموالکتریک با T_h و دمای قطب سردان با T_c نشان داده می‌شود. ضریب سیبک (S_m)، مقاومت الکتریکی (R_m) و ضریب رسانش حرارتی (K_m) به ترتیب توسط روابط (۵) و (۶) و (۷) مشخص می‌شوند:

$$S_m = \frac{V_{max}}{T_h} \quad (۵)$$

$$R_m = \frac{((T_h - \Delta T_{max}) V_{max})}{T_h I_{max}} \quad (۶)$$

$$K_m = \frac{((T_h - \Delta T_{max}) V_{max} I_{max})}{2 T_h \Delta T_{max}} \quad (۷)$$

به‌کاربردن قانون اول ترمودینامیک (قانون بقای انرژی) برای حجم کنترل شامل کولر ترموالکتریک می‌تواند توان مصرفی آن را به دست بدهد، در ابتدا بایستی نرخ انتقال

در مدل‌سازی ریاضی آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی چند اثر به‌کاررفته‌اند به شرح زیر می‌باشند:

- واحد تقطیر آب در مقابل بخار حاصل از تبخیر محکم بوده و بدون نشت است.
- تانک آب تغذیه به‌اندازه‌ای بزرگ هست که بتوان دمای آب درون آن را با دمای محیط یکسان در نظر گرفت.
- لوله‌کشی‌های به‌خوبی عایق‌بندی شده‌اند که بتوان از اتلاف حرارت از طریق آن‌ها صرف‌نظر کرد.
- جریان بشور گرم شده به‌صورت یک فیلم نازک بر روی سطح تبخیر جریان می‌یابد و واحد شیرین‌سازی را در دمای سطح تبخیر ترک می‌کند.
- مکانیسم انتقال حرارت از سطح تبخیر به سطح چگالش از طریق تبخیر، همرفت (جابجایی) و تشعشع است.

قانون اول ترمودینامیک برای مرحله اول آب‌شیرین‌کن به شرح زیر است:

$$(MC)_{P1} \frac{dT_{P1}}{dt} = \dot{m}_{f1} C_{pf} T_{co} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{1-2} - \dot{m}_{b1} C_{pb} T_{b1} \quad (۱)$$

که M بیانگر جرم محفظه عمودی، T_p بیانگر دمای مرحله یا به عبارتی دمای محفظه، C بیانگر ظرفیت حرارتی ویژه محفظه، \dot{m}_f دبی جرمی بشور واردشده به محفظه، C_{pf} ظرفیت حرارتی ویژه آب‌شور واردشده به محفظه، T_{co} بیانگر دمای بشور خارج‌شده از کلکتور، \dot{Q} بیانگر نرخ توان انتقال‌یافته به شکل حرارت، اندیس‌های c ، r و e برای توان حرارتی انتقال‌یافته به ترتیب بیانگر مکانیسم‌های همرفت، تشعشع و تبخیر است. \dot{m}_{b1} بیانگر بشور خارج‌شده از مرحله اول است. C_{pb} ، T_b به ترتیب بیانگر دما و ظرفیت حرارتی ویژه آب‌شور خارج‌شده است. بدیهی است که اندیس ۱ بیانگر مرحله اول و ۲-۱ از مرحله یک به مرحله دو است.

قانون اول ترمودینامیک برای تمامی مراحل بین مرحله اول و آخر به شرح مقابل است:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I_T} - \frac{F_R U_{L/T} (T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (13)$$

در این رابطه $U_{L/T}$ بیانگر ضریب اتلاف حرارتی وابسته به دما است. به صورت کلی رابطه بالا به شکل زیر نیز می‌توان بازنویسی کرد:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{\Delta T}{I_T} - a_2 \frac{\Delta T^2}{I_T} \quad (14)$$

در رابطه بالا ΔT بیانگر اختلاف دمای سیال عامل در ورود به کلکتور و دمای محیط است. باین‌حال برخی از گزارش‌های مربوط به آزمون کلک تورها اختلاف دما را گاهی بر اساس اختلاف دمای سیال در خروجی و دمای محیط و یا اختلاف میانگین دمای سیال (در خروجی و ورودی) و دمای محیط در نظر می‌گیرند. کل توان حرارتی دریافتی توسط هر یک از کلکتورهای صفحه تخت موجود (شماره این کلکتور را با z نشان می‌دهیم) در یک ارائه متشکل از N_s کلکتور به صورت سری توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_u = \frac{A}{N_s} \sum_{j=1}^N F_{R,j} (I_T(\tau\alpha) - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a)) \quad (15)$$

A کل مساحت ارائه است. I_T تشعشع کلی برخوردی به کلکتور است. T_i به ترتب بیانگر دمای ورودی به کلکتور است. F_R بیانگر فاکتور بازدهی کلکتور در خصوص برداشت حرارت است. τ بیانگر عبور پذیری پوشش کلکتور، α جذب پذیری صفحه جاذب و U_L بیانگر ضریب اتلاف کلی حرارت کلکتور به ازای واحد مساحت کلکتور و T_a بیانگر دمای محیط است. درنهایت می‌توان دمای سیال عامل خروجی از کلکتور صفحه تخت را به شکل زیر محاسبه کرد:

$$T_{o,j} = \frac{AF_{R,j}(I_T\tau\alpha - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a))}{N_s \dot{m}_c C_{p,c}} \quad (16)$$

۴- بررسی انرژی و انرژی

۴-۱- تحلیل انرژی (Energy Analysis)

تحلیل انرژی (Analysis Energy) یکی از روش‌های اساسی در ارزیابی سیستم‌های انرژی است که در آن بازده‌های حرارتی و کارایی انرژی در اجزای مختلف سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخلاف تحلیل انرژی

حرارت رخ داده در دو سمت گرم و سرد کولر ترمو الکتریک را به شرح زیر به دست آورد:

$$Q_c = S_m I T_c - \frac{I^2 R_m}{2} - K_m \Delta T \quad (8)$$

$$Q_h = S_m I T_h - \frac{I^2 R_m}{2} - K_m \Delta T \quad (9)$$

با در نظر گرفتن هوا به‌عنوان سیال کاری انتقال حرارت در دو قطب سرد و گرم کولر ترمو الکتریک می‌توان نرخ انتقال حرارت را در دو قطب سرد و گرم ترمو الکتریک را به شکل زیر نیز به دست آورد:

$$Q_c = \dot{m}_c (h_{in,c} - h_{out,c}) \quad (10)$$

$$Q_h = \dot{m}_h (h_{out,h} - h_{in,h}) \quad (11)$$

درنهایت با توجه به تغییر رطوبت نسبی و نسبت رطوبت می‌توان مقدار رطوبت استخراج شده از قطب سرد را محاسبه کرد.

۳-۳- مدل سازی پانل‌های فتوولتائیک-حرارتی (PV/T)

مدل سازی پانل‌های PV/T بر اساس اصول انرژی خورشیدی و تعادل حرارتی صورت گرفته است. این بخش شامل محاسبه انرژی الکتریکی تولیدی توسط سلول‌های فتوولتائیک و انرژی حرارتی جمع‌آوری شده توسط مبدل حرارتی است. بازده حرارتی و الکتریکی پانل‌ها با توجه به شدت تابش خورشیدی و شرایط محیطی تعیین شده‌اند. بازده یک کلکتور صفحه تخت از طریق رابطه کلی زیر قابل محاسبه است:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m} C_{pf} (T_o - T_i)}{AI_T} = \frac{F_R(\tau\alpha)_n}{I_T} - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I_T} \quad (12)$$

که در این رابطه Q_u برابر با حرارت انتقال یافته به سیال عامل کاری کلکتور است. A کل مساحت کلکتور است. I_T تشعشع کلی برخوردی به کلکتور است. \dot{m} و C_{pf} و T_o و T_i به ترتیب بیانگر دبی جرمی، ظرفیت حرارتی، دمای خروجی و دمای ورودی سیال عامل کلکتور می‌باشند. F_R بیانگر فاکتور بازدهی کلکتور در خصوص برداشت حرارت است. τ بیانگر عبور پذیری پوشش کلکتور، α جذب پذیری صفحه جاذب و U_L بیانگر ضریب اتلاف کلی حرارت کلکتور به ازای واحد مساحت کلکتور و T_a بیانگر دمای محیط است. از آنجایی که U_L پارامتری ثابت نیست، مناسب است که رابطه بازدهی کلکتور به شرح زیر بازنویسی شود:

مجموع اثرها = مجموع انرژی ورودی به سیستم
تبخیر

۵- محاسبه بازده انرژی کلی سیستم

$$\frac{\text{useful } Ex}{\text{solar } Ex} = \text{exergy } \eta$$

useful Ex: مجموع انرژی تبخیر آب + برق تولیدی

۶- تحلیل تلفات انرژی (Destruction Exergy):

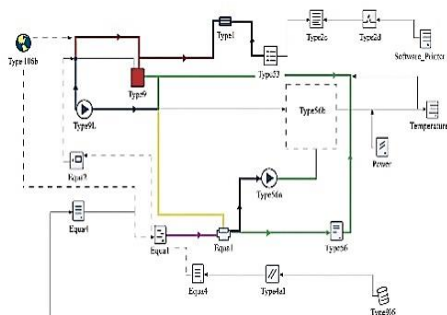
$$\text{lossEx} - \text{usefulEx} - \text{inputEx} = \text{destroyedEx}$$

در هر جزء سیستم PVT TE MED محاسبه می‌شود.

در این روش، با استفاده از داده‌های دمایی و جریان‌های انرژی به دست آمده از TRNSYS، می‌توان مقادیر انرژی ورودی، خروجی و تلفات را در هر یک از اجزای سیستم (از جمله کلکتور PVT، ماژول ترموالکتریک و سیستم VMED) محاسبه و تحلیل کرد. در نهایت، محاسبات انرژی در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Excel و بر اساس خروجی‌های TRNSYS انجام شده است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر بازده انرژی و شناسایی بخش‌های دارای اتلاف انرژی را فراهم می‌کند.

۵- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

شبیه‌سازی سامانه در نرم‌افزار ترنسیس انجام گرفت. نرم‌افزار ترنسیس توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی در حالت گذار و تحلیل تغییرات انرژی را دارد. این نرم‌افزار به‌طور پیش‌فرض کتابخانه‌های زیرمجموعه‌های سامانه تقطیری انتشار عمودی چند اثر (VMEDS) و ماژول ترموالکتریک را ندارد، ابتدا این زیرمجموعه‌ها با استفاده از روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شدند و سپس از طریق فرایند کد نویسی به نرم‌افزار اضافه گردیدند. برای مدل‌سازی این سیستم‌ها ابتدا محاسبات و روابط ترمودینامیکی انجام و پس از آن، مدل‌ها به نرم‌افزار منتقل شدند.



شکل (۶): شما تیک اولیه سامانه شبیه‌سازی شده در

نرم‌افزار ترنسیس

که به کیفیت انرژی توجه دارد، در این روش صرفاً کمیت انرژی و تبدیل‌های آن در نظر گرفته می‌شود. این تحلیل با تعیین مرزهای سیستم آغاز می‌شود:

۱- تعیین مرزهای سیستم:

در این مورد شامل کلکتور PVT (ترکیب فتوولتائیک-حرارتی)، مدول ترموالکتریک (TE) و سیستم نمک‌زدایی غشایی خلا (VMED) است.

۲- محاسبه انرژی ورودی خورشیدی

$$PVT A \cdot tG = \text{solar } Q$$

tG: تابش کل بر سطح کلکتور

PVT A: مساحت کلکتور

۳- محاسبه انرژی حرارتی تولیدی توسط PVT

$$Q_{in} = c_p (T_{in} - T_{out}) PVT$$

۴- محاسبه توان الکتریکی تولیدی توسط ترموالکتریک

$$TE P = \eta_{TE} Q_{in}$$

۵- محاسبه انرژی مورد استفاده در فرآیند VMED

حرارت مصرفی برای تبخیر آب در اثرها

- تلفات حرارتی در کندانسورها و بدنه

۶- راندمان کلی انرژی سیستم

$$\frac{\text{elec } Q_{evap} + P}{\text{solar } Q} = \text{energy } \eta$$

۴-۲- تحلیل تلفات انرژی (Exergy Analysis)

تحلیل انرژی به کیفیت انرژی‌ها و توانایی آن‌ها در انجام کار می‌پردازد. انرژی باکیفیت مثل برق، انرژی بالایی دارد. گرمای کم درجه مثل حرارت با دمای پایین انرژی کمی دارد.

مراحل تحلیل انرژی

۱- محاسبه انرژی ورودی خورشیدی با فرض

تابش مستقیم

$$\left(\frac{T_0}{T_{sun}} - 1 \right) \cdot tG \cdot PVT A = \text{solar } Ex$$

T₀: دمای مرجع (محیط)

T_{sun}: دمای معادل خورشید (به ۵۷۷۰ K)

۲- انرژی حرارتی از کلکتور

$$\dot{m} c_p \left[(T_{out} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{out}}{T_0} \right) \right] = \text{th } Ex$$

۳- انرژی برق تولیدی توسط T برابر با خود (توان)

$$TE P = \text{elec } Ex$$

۴- انرژی مصرفی در واحد VMED در اثرها

برای هر اثر:

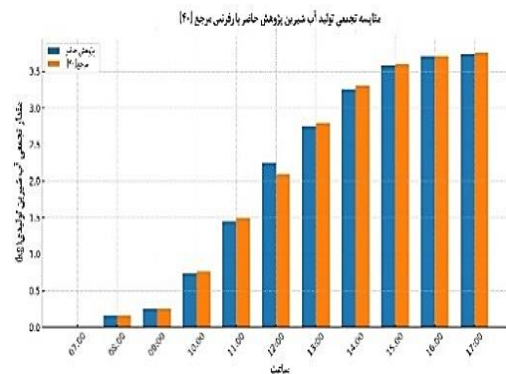
$$Q_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) = \text{VMED}_i Ex$$

سامانه کولر ترموالکتریک در اقلیم‌های مرطوب عملکرد مطلوب‌تری داشته و تولید آب در این شرایط بیشتر است. شهر کاشان در استان اصفهان از نظر اقلیمی در دسته اقلیم گرم و خشک (دسته‌بندی B3) قرار می‌گیرد. این طبقه‌بندی بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی ارائه‌شده توسط اشراقی و همکاران (۲۰۱۹) [۴۵] انجام شده است. با توجه به این خصوصیات، عملکرد سامانه تقطیر عمودی چندثانه هیبریدی (TC-PVT-VMED) در این اقلیم نتایج ذیل قابل پیش‌بینی است:

- بهره‌وری روزانه سیستم در کاشان در طول تابستان نسبت به زمستان بالاتر باشد، زیرا تابش خورشیدی و دما در این فصل‌ها بیشتر است.
- به دلیل اقلیم خشک و بارش کم، استفاده از این سیستم می‌تواند یکی از راهکارهای پایدار برای تأمین آب شیرین در این منطقه باشد.
- چالش‌ها: نیاز به سیستم خنک‌کننده مناسب به منظور جلوگیری از کاهش بهره‌وری در فصل زمستان است.

۶- صحت‌سنجی

مقدار تجمعی تولید آب شیرین در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و هندسی یکسان، با نتایج به‌دست‌آمده از مرجع [۳۱] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده‌شده، نمودار ستونی مقایسه‌ای بین مدل پیشنهادی و داده‌های مرجع را نشان می‌دهد. نتایج صحت‌سنجی حاکی از دقت قابل‌قبول مدل (با میانگین خطای کمتر از ۶ درصد) در شرایط واقعی است.



شکل ۷. نمودار مقایسه میزان تجمعی تولید آب شیرین با مرجع [۳۱]

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی از نسخه نرم‌افزار TRNSYS 18.02 استفاده گردید. اجزای مورد استفاده در مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار به شرح جدول ۶ مطابق ذیل است.

جدول (۶): اجزای مدل‌سازی شده در TRNSYS برای شبیه‌سازی سامانه تقطیر حرارتی خورشیدی

شماره	جزء سامانه	Type TRNSYS	عملکرد و توضیحات
۱	کلکتور خورشیدی PV/T	Type 50b	مدل ترکیبی پنل فوتولتائیک با جمع‌کننده حرارتی تخت
۲	مدول ترموالکتریک	Type 703 (user-defined)	مدل‌سازی بر اساس تعریف پارامترهای Seebeck، مقاومت، و رسانایی حرارتی
۳	مبدل حرارتی چندثانه (VMED)	Type 5a (Heat Exchanger)	مدل‌سازی انتقال حرارت بین مراحل با فرض شرایط جریان پایا
۴	پمپ جریان سیال	Type 110	ایجاد و تنظیم دبی سیال در حلقه سیستم
۵	منبع ذخیره انرژی گرمایی	Type 4	تانک ذخیره انرژی حرارتی با شرایط متغیر
۶	شرایط آب‌وهوایی	Type 109-TMY2	بارگذاری داده‌های تابش خورشیدی و دمای محیط
۷	کنترل‌کننده سیستم	Type 2	تعریف منطقی روشن/خاموش بودن بخش‌های مختلف سامانه

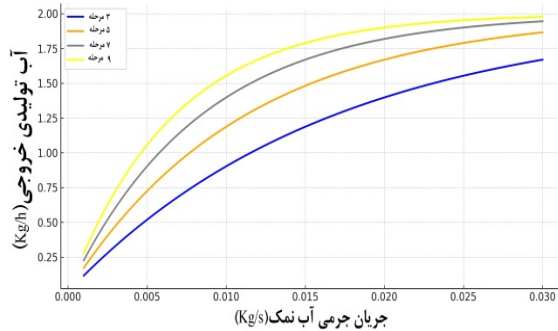
کار شبیه‌سازی تحت شرایط هواشناسی خاص در شهر کاشان انجام شد. برای تطبیق جدول با شرایط آب و هوایی شهر کاشان برای سیستم VMED-PVT-TC، می‌توان بر اساس داده‌های مشابه و با استفاده از اطلاعات هواشناسی کاشان، مقادیر مرتبط را ارائه کرد. در جدول ۷ یک نمونه ارائه شده است.

جدول (۷): شرایط آب و هوایی در آزمون عملکرد

سرعت باد، m/s	دمای محیط، °C	تابش خورشیدی، MJ/m ²	تاریخ آزمایش (dd-mm-yy)
1.2	27.5	14.30	06-05-2025
1.0	29.0	15.80	07-05-2025
1.5	30.3	16.50	08-05-2025
1.3	28.7	15.10	09-05-2025
1.1	27.9	14.80	10-05-2025
1.4	28.0	15.00	11-05-2025

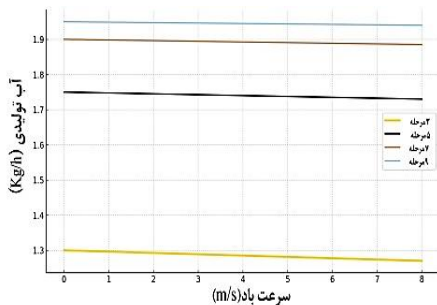
میزان تابش خورشیدی روزانه برای شهر کاشان مقداری بین ۱۴ تا ۱۷ MJ/m² است. همچنین میانگین دمای محیط در فصل‌های گرم‌تر، مانند بهار یا تابستان، برای کاشان تنظیم شده است. سرعت باد معمولاً در کاشان کمتر از ۲ m/s است و در روزهای گرم‌تر ثابت‌تر است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سامانه انتشار عمودی ۵ اثره در اقلیم‌هایی با تابش خورشیدی بالا عملکرد بهتری دارد و ظرفیت تولید آب بیشتری را ارائه می‌دهد. در مقابل،

چند اثر در رابطه با مقدار کل آب نمک زدایی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، افزایش دبی جرمی در هر مرحله تا یک مقدار معین منجر به افزایش مقدار آب شیرین سازی شده می‌شود که پس از آن تأثیری بر آب شیرین شده ندارد.



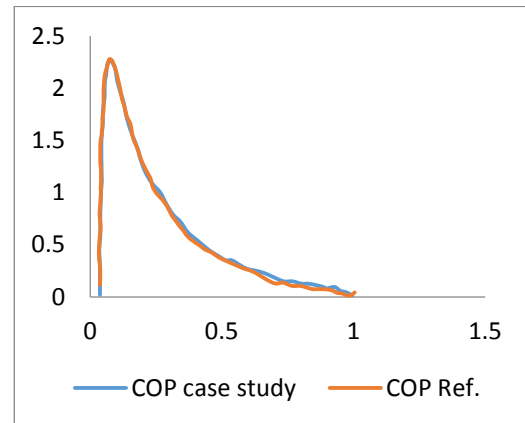
شکل (۱۰). تأثیر تعداد مراحل و سرعت جریان جرمی بشور ورودی به واحد تقطیر بر عملکرد واحد تقطیر انتشار عمودی چند اثر نسبت به مقدار کل نمک زدایی.

اثر سرعت باد بر مقدار کل آب شیرین شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. افزایش سرعت باد منجر به کاهش مقدار آب شیرین می‌شود. دلیل اصلی این پدیده این است که با افزایش سرعت باد، ضریب انتقال حرارت بین آخرین مرحله واحد تقطیر و محیط افزایش می‌یابد و در نتیجه گرما به جای استفاده برای نمک زدایی آب به محیط آزاد می‌شود. افزایش سرعت باد از ۰ به ۸ متر بر ثانیه منجر به کاهش ۱۸ درصدی میزان آب شیرین شده در واحد تقطیر سه مرحله‌ای می‌شود. همین مشکل منجر به کاهش ۲ درصدی آب شیرین تولیدی با افزایش تعداد اثرات تقطیر به ۹ می‌گردد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد اثرات، اثر منفی افزایش سرعت باد بر میزان آب شیرین شده کاهش می‌یابد.



شکل (۱۱). تأثیر سرعت باد بر میزان کل آب نمک زدایی شده توسط واحد تقطیر

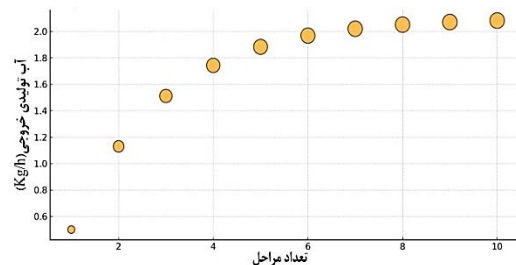
همچنین نتایج به دست آمده برای ضریب عملکرد خنک کننده ترموالکتریک (COP) از این مطالعه تحت شرایط مشابه با نتایج مرجع [۴۶] به عنوان نمونه مورد مقایسه قرار گرفت. که در شکل ۸ نشان ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج این مطالعه و مرجع ارائه شده وجود دارد.



شکل (۸): مقایسه ضریب عملکرد (COP) مطالعه حاضر تحت شرایط مشابه با نتایج مرجع [۴۶].

۷- تحلیل سیستم VMED-PVT-TC

تأثیر تعداد مراحل یک واحد تقطیر پخش عمودی چند اثر بر مقدار کل آب شیرین شده در شکل ۹ نشان داده شده است. بدیهی است که افزایش تعداد مراحل منجر به افزایش مقدار آب شیرین شده ناشی از آن می‌شود. برای استفاده از گرمای بیشتر از مراحل قبل. با این حال، زمانی که تعداد مراحل بیش از پنج باشد، مقدار نمک زدایی شده با شیب بسیار آهسته افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت افزایش تعداد مراحل بیش از پنج با توجه به رشد آب شیرین شده توجیه پذیر نیست.

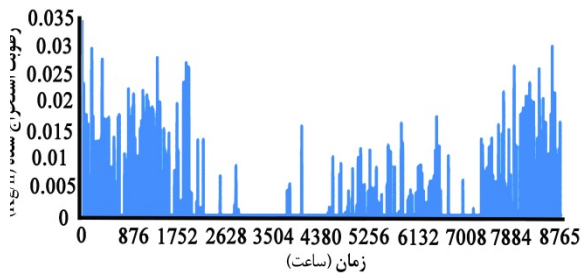


شکل (۹). تأثیر تعداد مراحل واحد تقطیر انتشار عمودی چنداثره بر حجم کل آب شیرین شده

تأثیر تعداد مراحل و سرعت جریان جرمی بشور ورودی به واحد تقطیر بر عملکرد یک واحد تقطیر با انتشار عمودی

۷-۲- تأثیر خنک‌کننده ترموالکتریک بر مقدار کلی آب شیرین

شکل ۱۳ میزان رطوبت حذف‌شده توسط خنک‌کننده ترموالکتریک در هر ساعت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد بیشترین میزان رطوبت حذف‌شده ۰٫۰۳۵ کیلوگرم در ۸۷۶۰ ساعت بوده است.

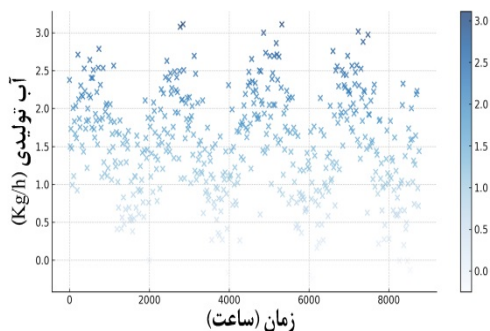


شکل (۱۳). میزان رطوبت حذف‌شده در هر ساعت توسط خنک‌کننده ترموالکتریک

به‌طور کلی عملکرد این سیستم در دماهای پایین‌تر بهتر است، زیرا می‌تواند دمای هوای خروجی را به زیر نقطه شبنم کاهش دهد.

۷-۳- میزان آب شیرین تولید‌شده در هر ساعت توسط سیستم تقطیر VMED-PVT-TC

میزان آب شیرین شده در هر ساعت سیستم تقطیر VMED-PVT-TC در شکل ۱۴ نشان داده شده است. هرچه اختلاف دمای بیشتری بین مراحل تبخیر و میعان در این سیستم برقرار باشد مقدار کل آب تولید‌شده در هر ساعت بیشتر است.

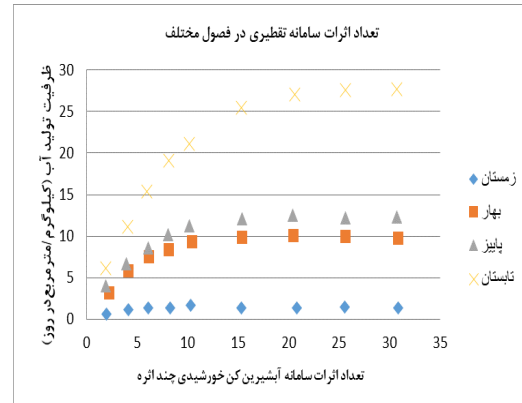


شکل (۱۴): میزان آب شیرین تولید‌شده در هر ساعت توسط سیستم تقطیر VMED-PVT-TC

۸- مطالعه تأثیرات محیطی

بهره‌وری سامانه تقطیر چنداثره عمودی (VMEDS) به‌شدت به دبی جریان بشور ورودی به هر اثر وابسته است.

تحلیل ترکیبی انرژی و انرژی نقاط قوت و ضعف سیستم را به‌طور دقیق مشخص می‌کند. این تحلیل نشان می‌دهد که بیشترین اتلاف انرژی در کدام قسمت از سیستم رخ می‌دهد و چگونه می‌توان با بهبود طراحی یا تغییر پارامترهای عملیاتی، کارایی را افزایش داد. بهینه‌سازی تعداد مراحل سامانه VMED می‌تواند به کاهش اتلاف انرژی و بهبود تولید آب شیرین منجر شود.



شکل (۱۲): میزان تولید آب در فصول مختلف و ارتباط آن با تعداد اثرات سامانه

شکل ۱۲ روند تغییرات مقدار تجمعی آب شیرین تولیدی در مقابل تعداد مراحل سامانه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، با افزایش تعداد مراحل از یک تا پنج، مقدار تولید آب به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته است. این افزایش ناشی از بهره‌برداری مرحله‌به‌مرحله از گرمای نهان میعان بخار در هر مرحله و انتقال مؤثر آن به مرحله بعدی است. در واقع، ساختار چنداثره‌ای موجب می‌شود که گرمای تلف‌شده در مراحل اولیه، به‌جای هدر رفتن، به‌صورت مؤثر در مراحل بعدی استفاده شده و فرآیند تبخیر در هر مرحله تکرار گردد. در حالت بهینه (۵ مرحله)، میزان تولید تجمعی آب به حدود ۳۶ لیتر در روز رسیده است که بالاترین مقدار ثبت‌شده در این تحلیل است. با این حال، پس از این نقطه، شیب افزایش تولید کاهش یافته و به سمت اشباع میل می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش بیش‌ازحد مراحل تقطیر، بازدهی را به‌صورت خطی افزایش نمی‌دهد، بلکه به دلیل محدودیت انتقال حرارت، افت فشار و پیچیدگی ساخت، ممکن است راندمان نهایی کاهش یابد.

دهد، زیرا این فرایند موجب کند انس بخار و تبدیل آن به آب می‌شود.

لازم به ذکر است که دبی بالاتر آب ورودی به سیستم، تولید را کاهش می‌دهد. زیرا با افزایش دبی، زمان تماس آب با سطح گرم کاهش یافته و تبخیر به درستی انجام نمی‌شود.

۹- مطالعه پارامترهای طراحی

تاثیر پارامترهای طراحی بر تولید آب شیرین در جدول ۹ ارائه می‌گردد:

جدول (۹): پارامترهای طراحی مؤثر در تولید آب شیرین

تعداد صفحات مؤثر (Nt)	فاصله صفحات (d)	زاویه انحراف صفحات (θ)	عوامل جزئی تر
افزایش تولید تا حد بهینه	افزایش یافته تا حد بهینه	بهبود تولید تا حد مشخص	اندازه قطرات میعان، سطح صفحات، و طراحی جمع‌کننده‌ها تأثیر قابل توجهی بر عملکرد دارند.

• **تعداد صفحات مؤثر (N):** افزایش تعداد صفحات موجب افزایش سطح تبخیر و بازده کلی می‌شود؛ با این حال، افزایش بیش از حد تعداد صفحات منجر به افزایش هزینه ساخت و تلفات حرارتی می‌گردد. لذا، تعیین تعداد بهینه صفحات اهمیت زیادی دارد.

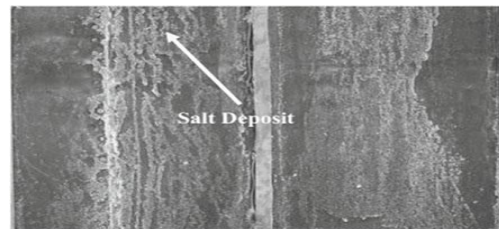
• **فاصله بین صفحات (d):** فاصله بهینه بین صفحات در محدوده ۴ تا ۵ میلی‌متر قرار دارد. کاهش بیش از حد فاصله ممکن است باعث تداخل جریان‌ها و کاهش نرخ تبادل جرم و حرارت شود. [39]

• **زاویه انحراف صفحات (θ):** زاویه صفحات نسبت به افق بین ۱۰ تا ۱۵ درجه، هم باعث هدایت بهتر آب مقطر و هم کاهش تلفات ناشی از تجمع قطرات می‌شود. انحراف بیش از این مقدار ممکن است سطح تماس تبخیری را کاهش دهد و باعث افزایش مقاومت گرمایی شود.

• **عوامل جزئی‌تر:** نوع و تعداد فاصله‌گذاری‌ها، مشخصات قطرات میعان، سطح ویژه صفحات، و طراحی بهینه جمع‌کننده‌ها به‌ویژه در فواصل کمتر از ۵ میلی‌متر، از جمله عوامل تعیین‌کننده در بازده عملکردی سیستم می‌باشند.

دبی جریان آب ورودی معمولاً بر اساس نرخ تبخیر در ساعات اوج فصل‌های موردنظر تعیین می‌شود. برای بهینه‌سازی عملکرد، دبی آب ورودی به هر اثر تقریباً دو برابر نرخ تبخیر حفظ می‌شود. در طول فرآیند، از اثر اول به اثر آخر، دبی جریان آب ورودی و نرخ تبخیر به تدریج کاهش می‌یابد. این روند با یافته‌های تاناکا و ناکاتاکه (۲۰۰۴) [۴۷] همخوانی دارد.

یکی از چالش‌های این سیستم‌ها، رسوب نمک در قسمت‌های مختلف سامانه، به‌ویژه در اولین بخش مخزن است که می‌تواند باعث کاهش کارایی و افزایش نیاز به تعمیر و نگهداری شود. شکل ۱۵ رسوب نمک روی اولین بخش مخزن در سیستم‌های نوع VMEDS را نشان می‌دهد که توسط کاوشال و همکاران (۲۰۱۷) بررسی شده است. این پدیده نیازمند تحقیق بیشتر برای کاهش اثرات منفی و بهبود عملکرد سامانه است.



شکل (۱۵): رسوب نمک بر روی اولین بخش مخزن

در سامانه تقطیر چنداثره عمودی نوع حوضچه‌ای [۴۸] به‌طور کلی نتایج حاصل از تأثیرات پارامترهای محیطی بر عملکرد سیستم‌های نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی (جدول ۸) به شرح مقابل است:

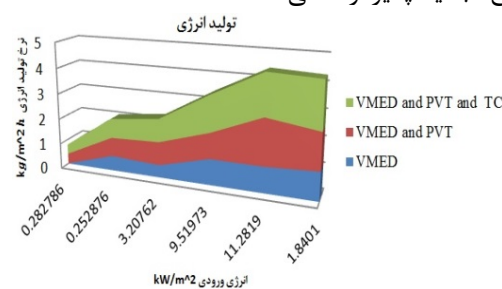
جدول (۸): پارامترهای محیطی بر عملکرد سیستم هیبریدی

شدت نور خورشید	دمای محیط	دمای آب ورودی	سرعت باد	دبی آب ورودی
افزایش تولید آب شیرین	افزایش تولید و تسریع در فرایند تبخیر	افزایش تولید آب شیرین	کاهش تولید	کاهش تولید

سرعت بادهای قوی ممکن است به‌طور نسبی تولید را کاهش دهند. با این حال، تغییرات سرعت باد تأثیر محدودی بر عملکرد سیستم‌ها دارد. این امر نشان می‌دهد که سیستم‌ها باید برای مقابله با نوسانات محیطی و تغییرات آب و هوایی مقاوم طراحی شوند. همچنین سرعت باد بر روی آخرین صفحه سیستم ممکن است به تشکیل کند انس کمک کند و در نتیجه تولید آب شیرین را افزایش

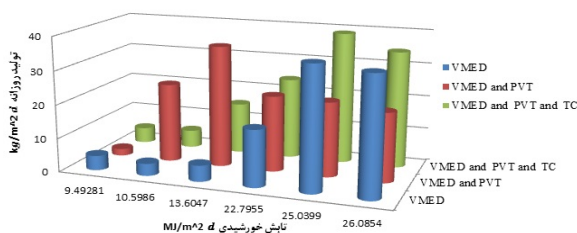
۱۰- مطالعه پارامترهای اقتصادی

بهینه‌سازی پارامترهای محیطی و طراحی به بهبود تولید، کاهش هزینه‌ها و اجرای کارآمدتر سیستم‌های تقطیر چنداثره منجر خواهد شد. به‌عنوان نمونه همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد، روند کلی افزایش تولید با افزایش ورودی حرارت قابل‌مشاهده است، اما تفاوت‌های بین انواع VMED و ترکیب آن با سیستم‌های خورشیدی و ترموالکتریک نشان می‌دهد که طراحی و شرایط عملیاتی نقش کلیدی در تعیین کارایی و خروجی این سیستم‌ها دارند. نمودار نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های فتوولتائیک حرارتی با ماژول‌های ترموالکتریک می‌تواند باعث بهبود عملکرد سیستم شود، به‌ویژه در شرایطی که نیاز به استفاده بهینه از انرژی ورودی و کاهش تلفات حرارتی وجود دارد. این مقایسه اطلاعات ارزشمندی برای طراحی بهینه سیستم‌های انرژی و نمک‌زدایی با بهره‌گیری از منابع تجدید پذیر ارائه می‌دهد.



شکل (۱۶): روند تولید انرژی در سه سیستم: تقطیر عمودی چنداثره، سیستم ترکیبی با پنل‌های فتوولتائیک حرارتی، و سیستم ترکیبی با پنل‌های فتوولتائیک حرارتی و ماژول‌های ترموالکتریک

شکل ۱۷ رابطه بین تولید آب مقطر و انرژی ورودی در یک سیستم تقطیر عمودی چنداثره (VMED) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی ورودی، تولید آب مقطر به‌طور کلی افزایش می‌یابد، که این وابستگی خروجی سیستم به مقدار انرژی تأمین‌شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تولید تقطیر با توجه به انرژی ورودی

ترکیب سیستم‌های خورشیدی و ترموالکتریک، به‌ویژه در سیستم‌های VMED، موجب افزایش کارایی فرآیند تقطیر می‌شود. این ترکیب با استفاده از پنل‌های خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی تجدید پذیر و سیستم‌های ترموالکتریک برای بهبود انتقال حرارت، توانایی بهره‌وری بالاتری را فراهم می‌کند و فرآیند تقطیر را به‌طور مؤثرتری هدایت می‌کند. در سیستم‌های VMED، استفاده از انرژی خورشیدی و ترموالکتریک به‌ویژه در بهبود عملکرد فرآیندهای تبادل حرارت و افزایش میزان تولید آب مقطر در شرایط عملی کمک می‌کند. این نوع تحلیل‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تقطیر در کاربردهای عملی و به‌ویژه در زیرساخت‌های انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای دستیابی به عملکرد بهتر، ارائه نرخ جریان یکنواخت برای خوراک در تمامی اثرات سیستم بسیار کارآمدتر از کنترل دقیق نرخ جریان متغیر است. این رویکرد به توزیع یکنواخت دما و فشار در تمامی مراحل تقطیر کمک می‌کند و در نتیجه کارایی سیستم افزایش می‌یابد. با این حال، مشکلاتی همچون جدا شدن فتیل‌ها و گرفتگی خطوط تغذیه آب دریا همچنان از چالش‌های عمده در حفظ عملکرد پایدار این سیستم‌ها به شمار می‌روند. این مسائل می‌توانند به کاهش بهره‌وری و عملکرد سیستم‌های VMED منجر شوند، بنابراین نیاز به توسعه و بهبود روش‌های نگهداری و طراحی این سیستم‌ها برای جلوگیری از چنین مشکلاتی ضروری است. به‌طور کلی، این تحلیل‌ها و بهبودها می‌توانند به بهره‌برداری بهتر از منابع انرژی و بهبود تأمین آب در مناطق با منابع آب محدود کمک کنند. عملکرد بهینه سیستم‌های تقطیر چنداثره عمودی (VMED) به مدیریت دقیق پارامترهای طراحی و عملیاتی وابسته است.

۱۱- نتیجه‌گیری

تحلیل عملکرد سیستم هیبریدی مطالعه حاضر (VMED-PVT-TC) نشان داد که در صورتی که پارامترهای محیطی و طراحی به‌صورت بهینه مورد استفاده قرار گیرند و تعادل بین هزینه و انرژی حرارتی مورد نیاز برقرار باشد، می‌تواند راندمان تولید آب شیرین سیستم را تا ۲۳٪ نسبت به سیستم‌های معمولی افزایش دهد. استفاده از فناوری ترموالکتریک در کاهش تلفات حرارتی و افزایش بازایی انرژی نقش مؤثری ایفا کرد و بازده انرژی سیستم را تا ۱۸٪ بهبود داد. از دیدگاه اقتصادی، پیش گرم کردن بشور هزینه تولید آب شیرین را تا ۲۵٪ کاهش می‌دهد. همچنین در افزایش تعداد مراحل یک نقطه بهینه‌ای

[14] Ooi ZY, Singh R. Hybrid study of a vacuum solar still in Malaysia. *Desalination*. 2009;247(1-3):1-12.

[15] Kumar P, Singh U. Numerical modeling of a multi-effect vacuum system in India. *Sol Energy*. 2012;86(9):2512-20.

[16] Fujii T, Nosoko T. Numerical analysis of a vertical still in Japan. *Desalination*. 1989;71(2):181-90.

[17] Ueda Y, Tanaka H. Testing of a vertical solar still with mirrors. *Desalination*. 2000;130(2):125-34.

[18] Miyazaki T, Akisawa A. Heat pipe-based solar collector for vertical still. *Sol Energy*. 2004;77(3):329-37.

[19] Saito K, Kashiwagi T. Modeling of an electrically assisted still. *Desalination*. 2010;250(1):298-305.

[20] Somchart C, Chindaruksa S. Study of a solar still in Thailand. *Renew Energy*. 1997;12(4):491-8.

[21] Al-Mansoori A, et al. Dynamic modeling of hybrid MED-TVC system with PV-thermal integration in arid regions. *Energy Convers Manag*. 2021;237:114123.

[22] Chen X, et al. Nano-enhanced solar desalination: Graphene-based filters in PTC-MED systems. *Appl Energy*. 2020;278:115678.

[23] Björnsson G, Stefánsson V. Geothermal-assisted multi-effect distillation: CFD and field tests in Iceland. *Desalination*. 2022;528:115632.

[24] Smith L, et al. Thermo-economic analysis of RO-MED hybrid systems in off-grid Australia. *Renew Sustain Energy Rev*. 2022;158:112045.

[25] Alotaibi S, et al. Hybrid MED-ADS system with metal-organic frameworks for enhanced solar desalination. *Desalination*. 2023;549:116328.

[26] García-Rodríguez L, et al. Dynamic simulation of MED with molten salt storage. *Renew Energy*. 2023;202:1432-45.

[27] El Rhafiki T, et al. Field performance of CSP-coupled MED in arid regions. *Sol Energy*. 2022;234:368-79.

[28] Ebadi H, Gorjian S, Sharon H, Blanco-Galvez J, Kumar A. Investigation of design configurations and effective parameters on productivity enhancement of vertical diffusion solar stills. *Int J Environ Sci Technol*. 2022;19(5):4187-222.

وجود دارد که هزینه‌ها و بازده را متعادل می‌کند. می‌توان از پتانسیل همچنین سامانه‌های هیبریدی در مناطق کم‌آب و دوردست برای تولید پایدار آب شیرین بیشتر همراه با تلفات انرژی کمتر مورد استفاده قرار داد.

۱۲- مراجع

[1] Elimelech M, Phillip WA. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*. 2011;333(6043):712-7.

[2] Gude VG. Desalination and sustainability: An appraisal and current perspective. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016;59:91-105.

[3] Sharonov VE. Thermoelectric cooling systems for improved energy efficiency in desalination plants. *Desalination*. 2020;485:114455.

[4] Panchal H, Sathyamurthy R. Experimental analysis of single-basin solar still with porous fins. *Int J Ambient Energy*. 2020;41(14):1-8.

[5] Velmurugan V, Gopalakrishnan M, Raghu R, Srihar K. Single basin solar still with fin for enhancing productivity. *Energy Convers Manag*. 2008;49(10):2602-8.

[6] Abujazar MSS, Fatihah S, Kabeel AE. Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate. *Desalination*. 2017;423:141-8.

[7] Tiwari GN, Kumar S. Thermal modeling of a triple effect active solar still. *Renew Energy*. 1999;16(1-4):231-4.

[8] Singh AK, Tiwari GN. Performance evaluation of a multi-effect stacked solar still. *Desalination*. 1993;94(1):71-82.

[9] Al-Kharabsheh S, Goswami DY. Experimental study of a four-effect solar still with vacuum tube collectors. *Sol Energy*. 2010;84(8):1496-504.

[10] Santos JD, Costa AL. Real-time performance of a seven-effect solar still in Brazil. *Desalination*. 2001;140(3):217-25.

[11] Zhang H, Wang L. Numerical and experimental analysis of a triple-effect solar still in China. *Appl Therm Eng*. 2013;50(1):1234-42.

[12] Tanaka H, Nakatake Y. Performance of a vacuum triple-effect solar still in Japan. *Desalination*. 1998;116(2-3):235-42.

[13] El-Bahi A, Inan D. Steady-state modeling of a vacuum solar still. *Renew Energy*. 2000;19(3):403-12.

- nanofluids and thermoelectric cooling: A comprehensive review. *Sustain Energy Technol Assess.* 2022;52:102292.
- [42] Li C, Goswami Y, Stefanakos E. Economic and environmental assessment of hybrid solar-thermoelectric desalination systems. *Appl Energy.* 2019;253:113535.
- [43] Lee HS. Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis. *Appl Energy.* 2013;106:79-88.
- [44] Lee HS. *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2010.
- [45] Eshraghi H, Ansari M, Moshari Sh, Gholami J. Climatic zoning and per capita demand forecast of Iran using degree-day method. *Adv Build Energy Res.* 2021;15(2):143-65.
- [46] Tanaka H, Nakatake Y. A simple and highly productive solar still: a vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat-plate mirror. *Desalination.* 2005;173(3):287-300.
- [47] Kaushal AK, Mittal MK, Gangacharyulu D. An experimental study of floating wick basin type vertical multiple effect diffusion solar still with waste heat recovery. *Desalination.* 2017;414:35-45.
- [48] Tanaka H. Thermal distillation system utilizing biomass energy burned in stove by means of heat pipe. *Alex Eng J.* 2016;55(3):2203-8.
- [49] Omara ZM, Kabeel AE, Abdullah AS. A review of solar still performance with reflectors. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;68:638-49.
- [50] Tanaka H, Nakatake Y. Numerical analysis of the vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector: optimum reflector angle and optimum orientation of the still at various seasons and locations. *Desalination.* 2007;207(1-3):167-78.
- [51] Tanaka H, Nakatake Y. Outdoor experiments of a vertical diffusion solar still coupled with a flat plate reflector. *Desalination.* 2007;214(1-3):70-82.
- [52] Huang BJ, Chong TL, Wu PH, Dai HY, Kao YC. Spiral multiple-effect diffusion solar still coupled with vacuum-tube collector and heat pipe. *Desalination.* 2015;362:74-83.
- [53] Huang L, Jiang H, Wang Y, Ouyang Z, Wang W, Yang B, et al. Enhanced water yield of solar desalination by thermal concentrated
- [29] Elsherbiny SM, Fath HES. Performance of diffusion stills under Egyptian climatic conditions. *Int J Sol Energy.* 1995;16(4):277-88.
- [30] El-Sebaili AA. Effect of wind speed on active and passive solar stills. *Energy Convers Manag.* 1998;39(3-4):293-302.
- [31] Reddy KS, Kumar KR, O'Donovan TS, Mallick TK. Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system. *Desalination.* 2012;288:80-92.
- [32] Sharon H, Reddy KS. Combining solar thermal desalination with thermoelectric cooling for enhanced freshwater production: A theoretical and experimental investigation. *Desalination.* 2015;372:42-53.
- [33] Xu Z, Zhang L, Zhao L, Li B, Bhatia B, Wang C, et al. Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still. *Energy Environ Sci.* 2020;13(3):830-9.
- [34] Sharon H, Reddy KS, Gorjian S. Parametric investigation and year round performance of a novel passive multi-chamber vertical solar diffusion still: energy, exergy and enviro-economic aspects. *Sol Energy.* 2020;211:831-46.
- [35] Dunkle RV. Solar water desalination: the roof type still and a multiple effect diffusion still. In: *Proceedings of the International Developments in Heat Transfer*; 1961; New York. ASME; 1961. p. 895-902.
- [36] Cooper PI, Appleyard JA. The construction and performance of a three-effect, wick-type, tilted solar still. *Sun at Work.* 1967;12:4-8.
- [37] Kiatsiriroat T, Bhattacharya SC, Wibulswas P. Performance analysis of multiple effect vertical still with a flat plate solar collector. *Sol Wind Technol.* 1987;4(4):451-7.
- [38] Tanaka H, Nakatake Y, Tanaka M. Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector. *Desalination.* 2005;177(1-3):291-302.
- [39] Kabeel AE, Abdelgaied M, Eisa A. Enhancing the performance of a multi-effect vertical solar still using thermoelectric modules: Experimental and theoretical study. *Energy Convers Manag.* 2020;205:112457.
- [40] Rahmani A, Boutina L. Dynamic modeling and performance analysis of a hybrid thermoelectric-solar multi-effect distillation system. *Renew Energy.* 2021;172:1293-305.
- [41] Elsheikh AH, Sharshir SW, Abd Elaziz M. Performance enhancement of solar stills using

multistage distiller. Desalination. 2020;477:114260.

[54] Tanaka H. Parametric investigation of a vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a tilted wick still. Desalination. 2017;408:119-26.

[55] Tanaka H, Iishi K. Experimental study of a vertical single-effect diffusion solar still coupled with a tilted wick still. Desalination. 2017;402:19-24.

[56] Fukui K, Nosoko T, Tanaka H, Nagata T. A new maritime lifesaving multiple-effect solar still design. Desalination. 2004;160(3):271-83.

[57] Al-Karaghoul A, Kazmerski LL. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. Renew Sustain Energy Rev. 2013;24:343-56.

[58] Thomson M, Infield D. A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. Desalination. 2003;153(1-3):1-8.