

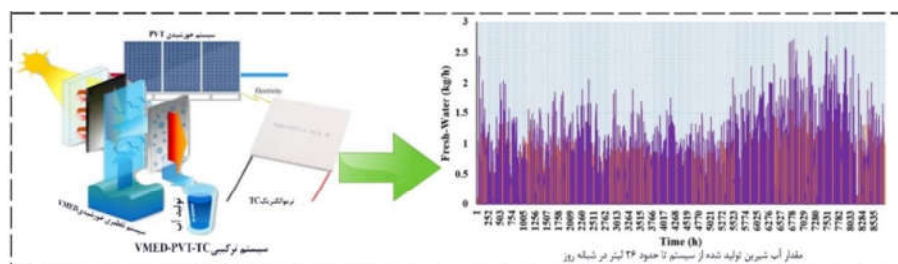
ارزیابی پارامترهای عملکردی یک سامانه نمک‌زدایی گرمایی خورشیدی تلفیقی با فناوری ترموالکتریک و انتشار عمودی چنداثره (VMED) و ارائه یک همبستگی جدید

محمدحسن کامیاب
دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران، mohammadhkamyab@gmail.com
علی اکبر عباسیان آرانی*
استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، اصفهان، ایران، abbasian@kashanu.ac.ir
سعید اسفنده
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران، saeedesfandeh.uk4@gmail.com

چکیده

افزایش بحران آب در مناطق خشک و دورافتاده، نیاز به توسعه سامانه‌های نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را دوچندان کرده است. در این پژوهش، یک سامانه ترکیبی نمک‌زدایی گرمایی خورشیدی با عنوان TC-PVT-VMED شامل سامانه تقطیر انتشار عمودی چنداثره (VMED)، پنل‌های فتوولتایی-گرما (T/PV) و مازول‌های ترموالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، افزایش بهره‌وری گرما و تولید هم‌زمان آب شیرین و انرژی در شرایط اقلیمی گرم و خشک می‌باشد. در این راستا، ابتدا مدل‌سازی ترمودینامیکی اجزای سامانه انجام شد و سپس رفتار دینامیکی سیستم با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS برای شهر کاشان شبیه‌سازی گردید. همچنین، یک رابطه تجربی جدید برای پیش‌بینی بهره‌وری سامانه بر اساس پارامترهای محیطی ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند که ادغام فناوری ترموالکتریک با سامانه VMED موجب افزایش ۲۳٪ کارایی نسبت به روش‌های مرسوم شده است. همچنین، انتخاب تعداد بهینه مراحل انتشار (۵ مرحله)، منجر به افزایش تولید آب شیرین تا ۳۶ لیتر در روز گردید. مدل پیشنهادی با ضریب همبستگی ۰/۹۶ و میانگین انحراف ۳/۲۴٪، دقت بالایی در تطابق با داده‌های تجربی نشان داد. این مطالعه می‌تواند پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های پایدار تولید آب در اقلیم‌های بحرانی فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: سامانه انتشار عمودی چنداثره (VMED)، پنل فتوولتایی-گرما (T/PV)، بهره‌وری انرژی، تحلیل آماری، ضریب همبستگی، انرژی تجدیدپذیر.



شکل ۱- بازده تولید آب در سیستم ترکیبی آب شیرین‌کن خورشیدی جدید

Evaluation of Performance Parameters of a Hybrid Solar Thermal Desalination System with Thermoelectric Technology and Vertical Multi-Effect Distillation (VMED) and a New Correlation

M. H. Kamyab
A. A. Abbasian Arani
S. Esfandeh

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
Faculty member, Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Abstract

The escalating water crisis in arid and remote regions has intensified the demand for renewable energy-based desalination systems. This study investigates a novel hybrid thermal solar desalination system named VMED-PVT-TC, which integrates a Vertical Multi-Effect Diffusion (VMED) unit, Photovoltaic-Thermal (PV/T) panels, and Thermoelectric (TE) modules. The primary objective is to enhance thermal efficiency and enable simultaneous freshwater and energy production under hot and dry climatic conditions. First, a comprehensive thermodynamic model of the system components was developed, followed by dynamic simulation using TRNSYS software. Furthermore, a new empirical correlation was proposed to predict the system's efficiency based on environmental parameters. Results indicate that integrating thermoelectric modules into the VMED system improved overall efficiency by 23% compared to conventional methods. Moreover, the optimal selection of five diffusion stages led to a freshwater yield of up to 36 liters per day. The proposed model demonstrated high accuracy with a correlation coefficient of 0.96 and a mean deviation of 3.24%. This study lays a solid foundation for the development of sustainable water production systems tailored for critical climatic zones.

Keywords: Vertical Multi-Effect Diffusion (VMED), Photovoltaic-Thermal (PV/T) Panel, Energy Efficiency, Statistical Analysis, Correlation Coefficient, Renewable Energy.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای آب شیرین در مناطق دورافتاده و خشک، نیاز به فناوری‌های مؤثر و پایدار در زمینه نمک‌زدایی را بیشتر کرده است. از میان این فناوری‌ها، سامانه‌های نمک‌زدایی گرمایی خورشیدی به دلیل قابلیت استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برای تولید آب شیرین، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. ادغام انرژی خورشیدی با فناوری‌های پیشرفته‌ای چون خنک‌کنندگی ترموالکتریک و تقطیر چنداثره، پتانسیل بالایی در بهبود کارایی و عملکرد سامانه‌های نمک‌زدایی نشان داده است. سامانه انتشار عمودی چنداثره (VMED) به‌عنوان یک روش نوین، به دلیل کارایی بالا در تولید آب شیرین با کیفیت، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. زمانی که این سامانه با فناوری ترموالکتریک ترکیب می‌شود، می‌توان با بازیابی گرما تلف‌شده و بهینه‌سازی مدیریت گرمایی، بهره‌وری سیستم را افزایش داد. (مطابق شکل ۱) روش‌های مرسوم نمک‌زدایی گرمایی به دلیل مصرف بالای انرژی و هزینه‌های عملیاتی زیاد، چالش‌هایی را ایجاد می‌کنند که نیازمند بهبود کارایی و توسعه فناوری‌های نوآورانه هستند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای نمک‌زدایی به عنوان رویکردی نوین و پایدار، پاسخی کارآمد به چالش‌های سه‌گانه بحران آب، انرژی، و محیط زیست است. این رویکرد دارای پاسخ به جنبه‌های تخصصی و کاربردی چالش کمبود آب، چالش انرژی و چالش زیست‌محیطی است.

استفاده از سامانه‌های هیبریدی، شامل تقطیر خورشیدی چنداثره و مولدهای استخراج آب از هوا، یک رویکرد جامع و مؤثر برای تأمین آب در مناطق دورافتاده است. این روش‌ها نه تنها پاسخگوی نیازهای آب و انرژی مناطق گرم و خشک هستند، بلکه در تدوین سیاست‌های پایدار منابع آب و انرژی نیز نقش کلیدی دارند.

با وجود پژوهش‌های متعددی که در زمینه سامانه‌های تقطیر خورشیدی و فناوری‌های ترکیبی انجام شده است، اغلب این مطالعات به بررسی جداگانه اجزای سامانه‌ها پرداخته و یا تحلیل جامعی از عملکرد یکپارچه سیستم‌های ترکیبی نداشته‌اند. همچنین، در بیشتر تحقیقات پیشین، به ارائه رابطه‌ای ساده و دقیق برای پیش‌بینی بهره‌وری کلی سامانه اشاره نشده است. در این پژوهش، با هدف بهبود عملکرد و ارزیابی جامع یک سامانه هیبریدی جدید، ابتدا طراحی یک سامانه ترکیبی شامل تقطیر عمودی چنداثره (VMED)، پنل‌های فتوولتایی-گرمایی (T/PV) و ماژول‌های ترموالکتریک (TEC) انجام شده است. سپس، با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی و شبیه‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار TRNSYS، عملکرد گرمایی و انرژی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته و یک رابطه جدید برای برآورد بهره‌وری سیستم ارائه شده است. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک ساختار ترکیبی سه‌گانه و مدل تحلیلی قابل تعمیم برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی در مناطق کم‌آب نهفته است. در ادامه مروری کوتاه بر فناوری‌های موجود آب شیرین‌کن‌های خورشیدی ارائه گردیده است.

۱-۱- اصول شیرین‌سازی آب

برای شیرین‌سازی آب دریا دو رویکرد مختلف وجود دارد. مورد اول فرآیندهای گرمایی بر پایه تبخیر آب از محلول آب نمک و تقطیر بخار

به منظور ایجاد مایع مقطر است. نیروی راه انداز در این حالت، گرمایی است که برای تبخیر نیاز است. مورد دوم فناوری، بصورت مکانیکی و بر پایه جداسازی به وسیله یک غشا است. ظهور این فناوری در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. در فناوری اسمز معکوس^۱ (RO)، نیروی راه انداز فشار هیدرولیک است. برای جداسازی آب از نمک، فشار باید بیش از فشار اسمزی باشد. فشار اسمزی، فشاری است که در اثر درون کنش مولکول‌های آب و نمک ایجاد می‌شود. فرآیند الکترودیالیز به وسیله جریان الکتریکی بین آند و کاتد انجام می‌شود که در این حالت آنیون‌ها و کاتیون‌ها از غشایی با بار انتخابی عبور می‌کنند. این غشا سبب می‌شود که آب خالص از محلول آب و نمک غلیظ، جدا شود.

۲-۱- فناوری‌های شیرین‌سازی گرمایی

شیرین‌سازی آب دریا به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها تبخیر چند مرحله‌ای (MSF) است. این روش حدود ۶۰ درصد از ظرفیت شیرین‌سازی جهانی را تشکیل می‌دهد و عمدتاً در مناطق خلیجی و با استفاده از گرما تلف‌شده نیروگاه‌های گرمایی اجرا می‌شود. در این روش، آب دریا در مراحل متوالی (۱۵ تا ۲۵ اتاقک خلاء) تبخیر و تقطیر می‌شود و با کاهش فشار و بازیابی گرما، انرژی مصرفی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (از ۷۰۰ به ۵۵ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب). روش دیگر تقطیر چند اثره (MED) است که مشابه MSF عمل می‌کند، اما در آن آب شور به جای ورود به اتاقک‌ها، روی مبدل‌های گرمایی پاشیده می‌شود. این روش بازده گرمایی بالاتری دارد، زیرا گرما نه تنها تبخیر مستقیماً بازیابی و استفاده می‌شود. روش سوم فشرده‌سازی بخار (VC) است که از کمپرسورهای مکانیکی (MVC) یا گرمایی (TVC) برای فشرده‌سازی بخار استفاده می‌کند. این روش معمولاً در ترکیب با MED به‌کار می‌رود و با افزایش فشار بخار، گرما نه تنها برای تبخیر آب دریا استفاده می‌شود.

۳-۱- فناوری‌های شیرین‌سازی مکانیکی (غشایی)

اسمز معکوس (RO) یک فناوری شیرین‌سازی آب است که برخلاف روش‌های گرمایی، از غشای انتخابی برای جداسازی آب از نمک‌ها و ناخالصی‌ها استفاده می‌کند. در این روش، آب تحت فشار از غشایی عبور می‌کند که تنها به مولکول‌های آب اجازه عبور می‌دهد و در برابر نمک‌ها مقاومت می‌کند. نیروی محرک این فرآیند، فشار اعمال‌شده است که باید بیشتر از فشار اسمزی (ناشی از تفاوت غلظت نمک در دو طرف غشا) باشد. اسمز معکوس انرژی کم‌تری مصرف می‌کند (کمتر از ۴ کیلووات‌ساعت برای تولید یک مترمکعب آب شیرین) و با بازیابی انرژی از آب باقی‌مانده (تحت فشار بالا)، بازده افزایش می‌یابد. سرعت بازگردانی برای آب دریا ۳۰ تا ۵۰ درصد و برای آب‌های شور تا ۸۰ درصد است. با این حال، غشاها به رسوب‌گیری حساس هستند و نیاز به پیش‌تصفیه و نگهداری دارند، و سیستم‌های RO به قطع و وصل‌های مکرر حساس هستند. در حال حاضر، ۴۲ درصد از ظرفیت شیرین‌سازی آب دریا در جهان بر پایه‌ی اسمز

¹ Reverse Osmosis

سامانه MED مدل کوچک و دو مرحله	خورشیدی	چین	آزمایشگاه هی	حدود ۲/۲	۲۰۲۴ [۴]
سیستم ترکیبی فعال خورشیدی با حوضچه	خورشیدی	لیبی	مدلسازی	۹/۵ ~	۲۰۲۵ [۵]
سامانه LT-MED با جریان متقاطع	گرمایش خورشیدی (باقی مانده بخار)	چین	شبیه ساز ی عددی	GOR بالا بهبود یافته	۲۰۲۴ [۶]
چند اثره تجمعی	گردآورنده تخت خورشیدی	هند	مدل ساز ی عددی انتقال گرما	۷.۶	۱۹۹۳ [۸]
چهار اثره تقطیری	گردآورنده لوله خلاء	خاور میانه	آزمایشات محیط داخل	۱۱	۲۰۱۰ [۹]
هفت اثره تقطیری	گردآورنده تخت خورشیدی	برز یل	آزمایش در زمان واقعی	۲۵	۲۰۰۱ [۱۰]
سه اثره تقطیری خلا	گردآورنده تخت خورشیدی	خاور میانه	مدلسازی ی عددی در حالت پایا	۹	۲۰۰۰ [۱۳]
چند اثره نمکزدایی خلا	گردآورنده تخت خورشیدی	هند	مدل ساز ی عددی انتقال گرما	۴.۱۷	۲۰۱۲ [۱۵]
چند اثره انتشار عمودی با حوضچه	حالت غیر فعال	ژاپن	مدل ساز ی عددی انتقال گرما	۴.۱۵	۱۹۸۹ [۱۶]

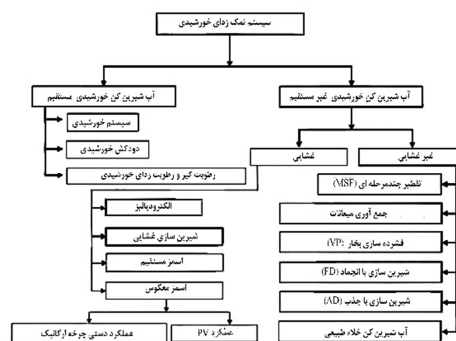
در میان انواع آب شیرین کن های تقطیری چند اثره خورشیدی نوع انتشار عمودی، عملکرد بهتری از نظر بهره وری و کیفیت آب تقطیر شده را نشان داده است. علت اصلی این موضوع این است که در نوع چند اثره انتشار عمودی آب شیرین کن تقطیری خورشیدی، شانس اختلاط آب خوراک (آب شور) با آب تقطیر شده (آب شیرین) بسیار پایین می باشد.

سامانه های تقطیر خورشیدی چنداثره عمودی (VMED) از سال ۱۹۶۴ مورد مطالعه قرار گرفته اند. تکامل این فناوری و علاقه فزاینده به بهینه سازی این سیستم ها برای تولید بهتر آب شیرین در شرایط مختلف و با استفاده از منابع متنوع گرمایی، موجب شده است که این روش به عنوان یکی از راهکارهای امیدوارکننده برای حل بحران آب در مناطق کم آب مورد توجه محققان قرار گیرد. آب شیرین کن تقطیری خورشیدی چند اثره انتشار عمودی از آرایش چندگانه صفحات تشکیل شده که در آن تعدادی صفحه عمودی به موازات یکدیگر همراه شکاف کوچکی بین صفحات تشکیل شده است. هر صفحه عمودی از یک

معکوس است و سهم این فناوری در بازار به طور پیوسته در حال افزایش است، زیرا نسبت به روش های گرمایی مصرف انرژی کم تر و هزینه های عملیاتی پایین تر دارد.

۴-۱- نمک زدایی خورشیدی^۱

نمک زدایی خورشیدی از انرژی خورشید برای شیرین سازی آب شور استفاده می کند و به دو روش مستقیم (تبخیر آب در حوضچه ها) و غیرمستقیم تقسیم می شود. روش غیرمستقیم شامل گرمایی (استفاده از متمرکزکننده های خورشیدی یا انرژی اتلافی) و مکانیکی (تبدیل انرژی خورشید به برق برای فرآیندهای غشایی مانند اسمز معکوس) است. این روش ها برای مناطق کم دسترسی به انرژی مناسب هستند. فناوری های نمک زدایی خورشیدی در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- طراحی های متنوع برای سیستم های تقطیر خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم [۱]

این شکل ساختار کلی سامانه ترکیبی VMED-PVT-TEC را نشان می دهد. اجزای اصلی شامل پنل PV/T، واحد تقطیر عمودی چنداثره، و مازول های ترموالکتریک هستند. طراحی سامانه به گونه ای است که جریان انرژی به صورت هدفمند در مسیر گرمایی بهینه هدایت شود.

۵-۱- دستگاه های تقطیر خورشیدی مستقیم چند اثره

دستگاه های تقطیر خورشیدی چند اثره به دلیل استفاده از حداکثر گرمای پراکنده شده، طراحی شده اند. در این نوع دستگاه ها بیش از یک پوشش شیشه ای بر روی سطح آب است؛ بنابراین از گرمای نهان تقطیر شدن برای افزایش بازده گرمایی دستگاه تقطیر خورشیدی استفاده می شود. [۲].

جدول ۱- خلاصه ای از انواع سامانه های تقطیری چند اثره کوچک

نوع سامانه	نوع منبع گرمایی	مکان	نوع بررسی	بازدهی (kg/m ² -d)	سال تحقیق
سامانه MED عملیاتی ۶ مرحله ای	خورشیدی (CSP)	-	آزمایشگاه هی	۱۲/۲۸	۲۰۲۵ [۳]

^۱ Solar Desalination

طرف با یک پارچه متخلخل پوشیده شده است. گرما به اولین صفحه آرایش چند صفحه‌ای 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 [۱۱] تاکنون تحقیقاتی زیادی بر روی آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی به صورت تجربی و عددی صورت گرفته است.

از نخستین این پژوهش‌ها توسط الشربینی و فاث 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. تاثیر 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 متر مربع 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. [۱۲] ال‌سبای یک مدل ریاضی گذرا را برای بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های انتشار عمودی، با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی برای یک روز آفتابی معمولی در تانتا واقع در مصر پیشنهاد کرد. نتایج نشان داد 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 [۱۳]. 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 آب شور 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 و شارون انجام شد. آن‌ها تعداد بهینه اثرات، سرعت جریان جرمی و شکاف تقسیم را به ترتیب ۵، ۲/۷ کیلوگرم در ساعت و ۰/۰۵ 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 خلا به‌دست آمد [۱۴] رفتار دینامیکی یک آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی چنداثره توسط محققان 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 نشان داد. نتایج تجربی در طول چهار روز معمولی در یک سال نشان داد که آب‌شیرین‌کن انتشار عمودی پنج اثره بهره‌وری بالاتری در حدود هفت برابر بیشتر از یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی معمولی حوضچه‌ای دارد [۱۵].

۱-۶- سامانه‌های ترکیبی

سامانه‌های انتشار عمودی چنداثره به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در نمک‌زدایی گرمایی 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 کم‌منابع و نیازمند به آب شیرین محدود می‌کنند. علاوه بر این، بهره‌وری پایین در استفاده از انرژی و اتلاف گرمایی، 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 تاثیر چشمگیری بر بهره‌وری داشته باشد. فناوری ترموالکتریک با قابلیت بازیابی انرژی گرمایی تلف شده و تبدیل آن به انرژی الکتریکی، نقش مهمی را ایفا می‌کند. تخمین زده می‌شود که هوای جوی حاوی حدود شش تا ده گرم آب شیرین در هر متر مکعب است که منبع امیدوارکننده‌ای برای استخراج آب شیرین است. خنک‌کننده‌های ترموالکتریک (TEC) یک جایگزین مبتنی بر الکتریسیته ارائه می‌کنند و از اثر پلتیه برای انتقال گرما استفاده می‌کنند. در حالی که 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 [۳۰-۳۳]. لیو و همکاران [۳۴] یک واحد نمک‌زدایی ۷ کیلوگرمی با ماژول‌های ترموالکتریک دوگانه را مطالعه کردند و دریافتند که رطوبت هوای ورودی بالاتر تولید آب را افزایش می‌دهد. تاثیر 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. بنابراین، گسترش تحقیقات در زمینه بهینه‌سازی سامانه‌های انتشار عمودی چنداثره و ادغام آن‌ها با فناوری‌هایی نظیر ترموالکتریک، مسیری امیدوارکننده برای افزایش بهره‌وری و کاهش چالش‌های موجود در این حوزه است.

۲- معرفی ایده ترکیبی پیشنهادی

ایده ترکیبی پیشنهادی در پژوهش حاضر، ادغام سامانه نمک‌زدایی گرمایی خورشیدی با فناوری ترموالکتریک و سیستم انتشار عمودی چنداثره (VMED) است. در این سامانه، از پنل‌های فتوولتایی-گرمایی (T/VP) برای تأمین همزمان انرژی الکتریکی و گرمایی استفاده می‌شود، در این سیستم، به‌منظور بازیابی گرما تلف‌شده و افزایش بهره‌وری کلی، ماژول‌های ترموالکتریک به‌کار گرفته می‌شوند. این ماژول‌ها از توانایی خود در انتقال گرما برای خنک‌سازی و بهبود عملکرد اجزای مختلف سامانه بهره می‌برند. ترکیب این سه فناوری (T/VP)، ترموالکتریک و VMED می‌تواند به‌طور قابل توجهی کارایی و پایداری سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی را افزایش داده و راه‌حلی پایدار و کارآمد برای تأمین آب شیرین در مناطق با منابع محدود آبی فراهم آورد. شکل ۳، نحوه انتقال انرژی گرمایی و الکتریکی در سامانه را به‌تصویر می‌کشد. مسیرهای انتقال انرژی در بین اجزای T/VP، TEC و VMED به‌وضوح مشخص شده و بیانگر ساختار انرژی-محور سامانه است.

$$(MC)_{PN} \frac{dT_{PN}}{dt} = \dot{m}_{fN} C_{pf} T_{co} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{(N-1)-N} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{N-a} - \dot{m}_{bN} C_{pb} T_{bN} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که اندیس a بیانگر محیط بیرون می‌باشد. انتقال توان گرمایی از طریق مکانیزم همرفتی به شکل زیر بدست می‌آید:

$$Q_{i-(i+1)} = h_{c(i)} A_p (T_{p(i)} - T_{p(i+1)}) \quad (4)$$

در این رابطه h_c بیانگر ضریب انتقال گرما می‌باشد. A_p بیانگر سطح انتقال گرما (تبخیر یا چگالش) می‌باشد.

۳-۲- مدل‌سازی ماژول‌های ترموالکتریک (TE)

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

$$S_m = \frac{V_{max}}{T_h} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) V_{max}}{T_h I_{max}} \quad (6)$$

$$K_m = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) V_{max} I_{max}}{2 T_h \Delta T_{max}} \quad (7)$$

به‌کاربردن قانون اول ترمودینامیک (قانون بقای انرژی) برای حجم کنترل شامل کولر ترموالکتریک می‌تواند توان مصرفی آن را بدست بدهد، در ابتدا بایستی آهنگ انتقال گرما رخ داده در دو سمت گرم و سرد کولر ترمو الکتریک را به شرح زیر بدست 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 به عنوان سیال کاری انتقال گرما در دو قطب سرد و گرم کولر ترموالکتریک می‌توان آهنگ انتقال گرما را در دو قطب سرد و گرم ترموالکتریک را به شکل زیر نیز بدست آورد:

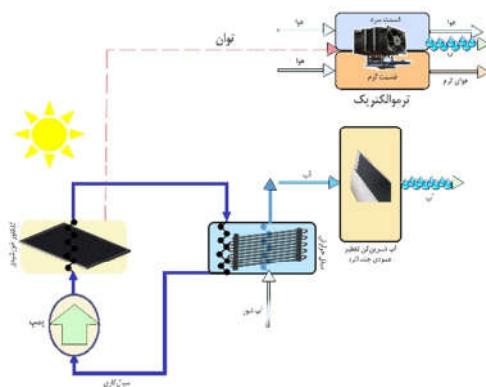
$$Q_c = \dot{m}_c (h_{in,c} - h_{out,c}) \quad (10)$$

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

در نهایت باتوجه به تغییر رطوبت نسبی و نسبت رطوبت می‌توان مقدار رطوبت استخراج شده از قطب سرد را محاسبه کرد.

۳-۳- مدل‌سازی پانل‌های فتوولتایی - گرمایی (PV/T)

مدل‌سازی پانل‌های PV/T بر اساس اصول انرژی خورشیدی و تعادل گرمایی صورت گرفته است. این بخش شامل محاسبه انرژی الکتریکی تولیدی توسط سلول‌های فتوولتایی و انرژی گرمایی جمع‌آوری‌شده توسط مبدل گرمایی است. بازده گرمایی و الکتریکی پانل‌ها با توجه به شدت تابش خورشیدی و شرایط محیطی تعیین می‌شود:



شکل ۳- افزایش بهره‌وری سیستم نمک‌زدایی گرمایی خورشیدی در ترکیب با ترموالکتریک و سامانه انتشار عمودی چنداثره

۳-۲- مدل‌سازی سیستم

این سیستم شامل سه بخش اصلی است: سامانه انتشار عمودی چنداثره (VMED)، ماژول‌های ترموالکتریک (TE)، و پانل‌های فتوولتایی-گرمایی (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 گرما و جرم صورت گرفته است. در این واحد، آب شور از یک منبع ذخیره‌ساز گرمایی پیش‌گرم شده و سپس از طریق لوله‌ها به واحد نمک‌زدایی جاری می‌شود. پس از این مراحل، آب شور از طریق چندین مرحله تقطیر و جداسازی میانی خالص شده و به آب تصفیه شده تبدیل می‌شود. قانون اول ترمودینامیک برای مرحله اول آب‌شیرین‌کن به شرح زیر می‌باشد:

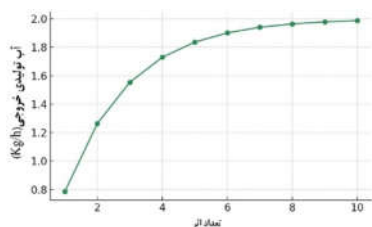
$$(MC)_{P1} \frac{dT_{P1}}{dt} = \dot{m}_{f1} C_{pf} T_{co} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{1-2} - \dot{m}_{b1} C_{pb} T_{b1} \quad (1)$$

که M بیانگر جرم محفظه عمودی، T_p بیانگر دمای مرحله یا به عبارتی دمای محفظه، C بیانگر گرمای ویژه محفظه، $\dot{m}_f$ دبی جرمی آبشور وارد شده به محفظه، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه آبشور وارد شده به محفظه، T_{co} بیانگر دمای آبشور خارج شده از گردآور، $\dot{Q}$ بیانگر نرخ توان انتقال یافته به شکل گرما، اندیس‌های c و r برای توان گرمایی انتقال یافته به ترتیب بیانگر مکانیزم‌های همرفت، تابش و تبخیر می‌باشد. $\dot{m}_{b1}$ بیانگر آبشور خارج شده از مرحله اول می‌باشد. C_{pb} ، T_b به ترتیب بیانگر دما و ظرفیت گرمایی ویژه آبشور خارج شده می‌باشند. بدیهی است که اندیس ۱ بیانگر مرحله اول و ۲ از مرحله یک به مرحله دو می‌باشد.

قانون اول ترمودینامیک برای تمامی مراحل بین مرحله اول و آخر به شرح زیر می‌باشد:

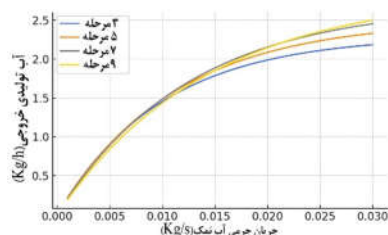
$$(MC)_{Pi} \frac{dT_{Pi}}{dt} = \dot{m}_{fi} C_{pf} T_{co} + (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{(i-1)-i} - (\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e)_{i-(i+1)} - \dot{m}_{bi} C_{pb} T_{bi} \quad (2)$$

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



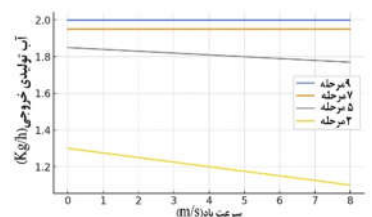
شکل ۴- تأثیر تعداد مراحل واحد تقطیر انتشار عمودی چنداثره بر حجم کل آب شیرین شده

تأثیر تعداد مراحل و سرعت جریان جرمی آب شور ورودی به واحد تقطیر در شکل ۵ 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 می شود افزایش مراحل باعث افزایش محسوس تولید شده، اما روند از ۵ مرحله به بعد اشباع می شود. این نشان دهنده وجود نقطه بهینه در طراحی تعداد مراحل است.



شکل ۵- تأثیر تعداد مراحل و سرعت جریان جرمی آب شور ورودی به واحد تقطیر بر عملکرد واحد تقطیر انتشار عمودی چند اثره نسبت به مقدار کل نمک زدایی

اثر سرعت باد بر مقدار کل آب شیرین شده در شکل ۶ نشان داده شده است. افزایش سرعت باد منجر به کاهش مقدار آب شیرین می شود. با افزایش سرعت باد، ضریب انتقال گرما بین آخرین مرحله واحد تقطیر و محیط افزایش می یابد و در نتیجه گرما به جای استفاده برای نمک زدایی آب به محیط آزاد می شود. افزایش سرعت باد از ۰ به ۸ منجر به کاهش ۱۸ درصدی میزان آب شیرین شده در واحد تقطیر سه مرحله ای می شود. همین مشکل منجر به کاهش ۲ درصدی آب شیرین تولیدی با افزایش تعداد اثرات تقطیر به ۹ می شود.



شکل ۶- تأثیر سرعت باد بر میزان کل آب نمک زدایی شده توسط واحد تقطیر

این تحلیل ها نشان داده اند که بهینه سازی تعداد مراحل سامانه VMED می تواند به کاهش اتلاف انرژی و بهبود تولید آب شیرین منجر شود.

شده اند. بازده یک گردآور صفحه تخت از طریق رابطه کلی زیر قابل محاسبه است:

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

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

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

در این رابطه $U_{L/T}$ بیانگر ضریب اتلاف گرمایی وابسته به دما می باشد. به صورت کلی رابطه بالا به شکل زیر نیز می توان 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 گردآور و دمای محیط می باشد. با این حال برخی از گزارش های مربوط به تست گردآورها اختلاف دما را گاها 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 می گیرند. کل توان گرمایی دریافتی توسط هر یک از گردآورهای صفحه تخت موجود (شماره این گردآور را با N_s نشان می دهیم) در یک ارایه متشکل از N_s گردآور به صورت سری توسط رابطه زیر بدست می آید:

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

A کل مساحت ارایه است. I_T تابش کلی برخوردی به گردآور است. T_i به ترتیب بیانگر دمای ورودی به گردآور است. F_R بیانگر فاکتور بازدهی گردآور در خصوص برداشت گرما است. τ بیانگر عبورپذیری پوشش گردآور، α جذب پذیری صفحه جاذب و U_L بیانگر ضریب اتلاف کلی گرما گردآور به ازای واحد مساحت گردآور و T_a بیانگر دمای محیط می باشد. در نهایت می توان دمای سیال عامل خروجی از گردآور صفحه تخت را به شکل زیر محاسبه کرد:

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

۴- بررسی انرژی و انرژی

تأثیر تعداد مراحل یک واحد تقطیر پخش عمودی چند اثره بر مقدار کل آب شیرین شده در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش تعداد مراحل میزان مقدار آب شیرین شده برای استفاده افزایش می یابد با این حال، زمانی که تعداد مراحل بیش از پنج باشد، مقدار نمک زدایی شده با شیب بسیار آهسته افزایش می یابد. به عبارت دیگر می توان گفت افزایش تعداد مراحل بیش از پنج با توجه به رشد آب شیرین شده توجیه پذیر نیست.

این فرآیند امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر عملکرد سیستم را فراهم ساخت و نتایج آن به تحلیل و بهینه‌سازی طراحی سامانه کمک کرد. 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 ۲ یک نمونه ارائه شده است.

جدول ۲- شرایط آب و هوایی در آزمون عملکرد

سرعت باد، m/s	دمای محیط، °C	تابش خورشیدی، MJ/m ²	تاریخ آزمایش
۱/۲	۲۷/۵	۱۴/۳۰	۰۶-۰۵-۲۰۲۵
۱/۰	۲۹/۰	۱۵/۸۰	۰۷-۰۵-۲۰۲۵
۱/۵	۳۰/۳	۱۶/۵۰	۰۸-۰۵-۲۰۲۵
۱/۳	۲۸/۷	۱۵/۱۰	۰۹-۰۵-۲۰۲۵
۱/۱	۲۷/۹	۱۴/۸۰	۱۰-۰۵-۲۰۲۵
۱/۴	۲۸/۰	۱۵/۰۰	۱۱-۰۵-۲۰۲۵

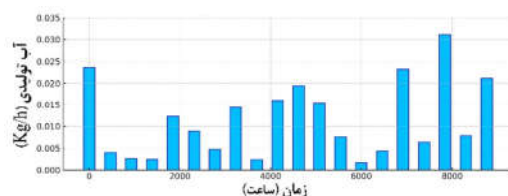
مقدار تابش خورشیدی روزانه برای کاشان به دلیل آفتابی بودن منطقه می‌تواند مقداری بین ۱۴ تا ۱۷ MJ/m² باشد. همچنین میانگین دمای محیط در فصل‌های گرم‌تر، مانند بهار یا تابستان، برای کاشان تنظیم شده است. سرعت باد معمولاً در کاشان کمتر از ۲ m/s است و در روزهای گرم‌تر ثابت‌تر است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد 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، سامانه کولر ترموالکتریک در اقلیم‌های مرطوب عملکرد مطلوب‌تری داشته و تولید آب در این شرایط بیشتر است. با این حال، در اقلیم‌های کم‌رطوبت، تولید سامانه کولر ترموالکتریک در برخی مواقع به صفر می‌رسد.

۷- تحلیل سیستم VMED-PVT-TC در اقلیم کاشان

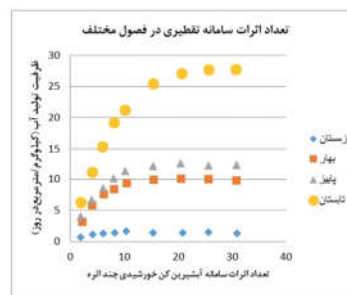
با توجه به این خصوصیات، عملکرد سامانه تقطیر عمودی چنداثره هیبریدی (VMED-PVT-TC) در این اقلیم نتایج ذیل قابل پیش بینی می‌باشد:

- 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.
- نیاز به سیستم خنک‌کننده مناسب به منظور جلوگیری از کاهش بهره‌وری در فصل زمستان می‌باشد.

۷-۱- تأثیر خنک‌کننده ترموالکتریک بر مقدار کلی آب شیرین



شکل ۹- میزان رطوبت حذف‌شده در هر ساعت توسط خنک‌کننده ترموالکتریک



شکل ۷- میزان تولید آب در فصول مختلف و ارتباط آن با تعداد اثرات سامانه

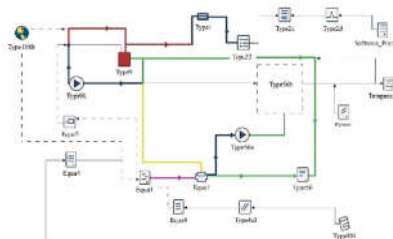
شکل ۷ روند تغییرات مقدار تجمعی آب شیرین تولیدی در مقابل تعداد مراحل سامانه را نمایش می‌دهد. با افزایش تعداد مراحل از یک تا پنج، مقدار تولید آب به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته است. این افزایش ناشی از بهره‌برداری مرحله‌به‌مرحله از گرمای نهان میعان بخار در هر مرحله و انتقال مؤثر آن به مرحله بعدی می‌باشد. 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 بیش از حد مراحل تقطیر، بازدهی را به‌صورت خطی افزایش نمی‌دهد، بلکه به دلیل محدودیت انتقال گرما، راندمان نهایی کاهش می‌یابد.

۵- مطالعه تأثیرات محیطی

بهره‌وری سامانه تقطیر چنداثره عمودی (VMEDS) به‌شدت به دبی جریان آب شور ورودی به هر اثر وابسته است. دبی جریان آب ورودی معمولاً بر اساس نرخ تبخیر در ساعات اوج فصل‌های مورد نظر 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 به‌تدریج کاهش می‌یابد. 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.

۶- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

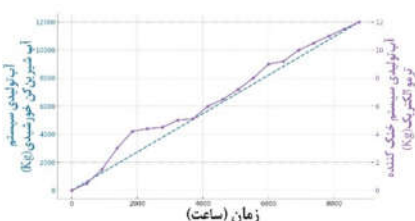
شبیه‌سازی سامانه در نرم‌افزار TRNSYS انجام گرفت. نرم‌افزار TRNSYS توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی در حالت گذار و تحلیل تغییرات انرژی را دارد.



شکل ۸- طرحواره اولیه سامانه شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار TRNSYS

میزان رطوبت حذف شده توسط خنک کننده ترموالکتریک در هر ساعت (شکل ۹) نشان می دهد که عملکرد این سیستم در دماهای پایین تر بهتر است، زیرا می تواند دمای هوای خروجی را زیر نقطه شبنم کاهش دهد. بیشترین میزان رطوبت حذف شده ۰/۰۳۵ کیلوگرم در ۸۶۰۰ ساعت بوده است.

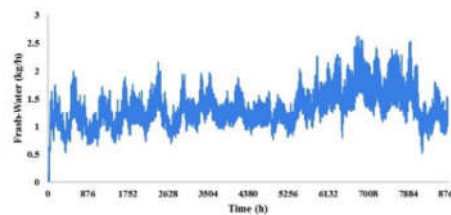
در شکل ۱۰، سیستم تقطیر همواره مقدار بیشتری آب تولید کرده، به طوری که در یک سال کاری، ۱۲/۰۰۰ کیلوگرم آب شیرین از تقطیر و تنها ۱۱ کیلوگرم از خنک کننده ترموالکتریک به دست آمده است، یعنی مجموعاً ۱۲/۰۱۱ کیلوگرم ای تولید می گردد. در فصول سرد، تولید آب توسط خنک کننده ترموالکتریک شدت بیشتری دارد، در حالی که در فصول گرم و با افزایش تابش خورشیدی، سیستم تقطیر عملکرد بهتری در تولید آب شیرین دارد.



شکل ۱۰- میزان آب شیرین تجمعی تولید شده توسط سیستم تقطیر و سیستم خنک کننده ترموالکتریک

۲-۷- میزان آب شیرین تولید شده در هر ساعت توسط سیستم تقطیر VMED-PVT-TC

میزان آب شیرین شده در هر ساعت سیستم تقطیر VMED-PVT-TC در شکل ۱۱ نشان داده شده است. هرچه اختلاف دمای بیشتری بین مراحل تبخیر و میعان در این سیستم برقرار باشد مقدار کل آب تولید شده در هر ساعت بیشتر است.



شکل ۱۱- میزان آب شیرین تولید شده در هر ساعت توسط سیستم تقطیر VMED-PVT-TC

۸- مدل همبستگی جدید

برای ارائه یک مدل پیشنهادی به منظور برآورد بهره‌وری روزانه سیستم مورد مطالعه باید از داده‌های تجربی و روش‌های رگرسیون چندمتغیره استفاده شود. بهره‌وری سیستم VMED-PVT-TC می‌تواند به صورت تابعی از متغیرهای وابسته به شکل زیر بیان گردد:

$$f(Q_{in}, T_a, V_w, f, T_f, N) = P$$

P - بهره‌وری روزانه است (بر حسب $\text{day}^{-1} \text{m}^3/\text{kg}$)

- ورودی گرمایی روزانه به دستگاه (Q_{in})

- دمای متوسط روزانه محیط (T_a)

- سرعت متوسط باد روزانه (V_w)

- نرخ آب ورودی (f)

- دمای متوسط آب ورودی (T_f)

- تعداد اثرها (N)

همبستگی بهره‌وری در قالب یک معادله غیرخطی قدرتی (linear-non law power) توسعه یافته است. معادله می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$P = C \times (Q_{in})^{n_1} (T_a)^{n_2} (V_w)^{n_3} (f)^{n_4} (T_f)^{n_5} (N)^{n_6} \quad (17)$$

که در اینجا:

C - یک ثابت ناشناخته است

- $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ توان‌های ناشناخته‌اند که از طریق داده‌های تجربی به دست می‌آیند.

این معادله غیرخطی به منظور تخمین بهره‌وری دستگاه با توجه به پارامترهای مختلف طراحی و عملکرد آن توسعه داده شده است:

$$P = 0.85 \times (Q_{in})^{0.6} (T_a)^{0.2} (V_w)^{-0.3} (f)^{-0.4} (T_f)^{0.3} (N)^{0.5} \quad (18)$$

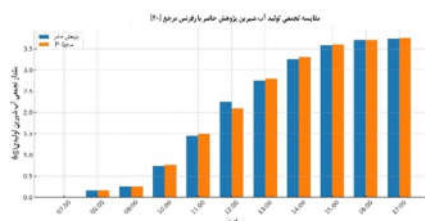
۹- صحت سنجی

میزان تجمعی تولید آب شیرین در مطالعه حاضر با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و هندسی یکسان، با نتایج به دست آمده از مرجع [۴۰] مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، سطح خطای به دست آمده در این مقایسه در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

جدول ۳- میزان تجمعی تولید آب شیرین و مرجع [۴۰]

Time	(kg/day) (مطالعه حاضر)	(kg/day) (مرجع)	Error%
۷:۰۰	۰۰,۰	۰۰,۰	-۵/۸۸۳۳۵
۸:۰۰	۰/۱۵۵	۰/۱۷	-۳/۸۴۶۱۵
۹:۰۰	۰/۲۵	۰/۳۶	-۲/۶۳۱۵۸
۱۰:۰۰	۰/۷۴	۰/۷۶	-۳/۳۳۳۳
۱۱:۰۰	۱/۴۵	۱/۵	۷/۱۴۲۸۵۷
۱۲:۰۰	۲/۲۵	۲/۱	-۱/۷۸۵۷۱
۱۳:۰۰	۲/۷	۲/۸	-۱/۵۱۵۱۵
۱۴:۰۰	۳/۲۵	۳/۳	-۰/۵۵۵۵۶
۱۵:۰۰	۳/۵۸	۳/۶۰	-۰/۳۶۹۵۴
۱۶:۰۰	۳/۶۹	۳/۷۱	-۰/۵۳۳۳۳
۱۷:۰۰	۳/۷۳	۳/۷۵	-۵/۸۸۳۳۵

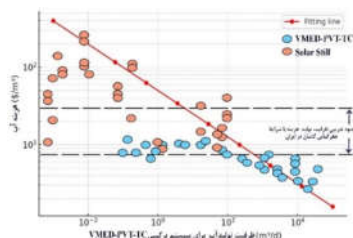
شکل ۱۲ نمودار ستونی مقایسه‌ای بین مدل پیشنهادی و داده‌های مرجع را نشان می‌دهد. نتایج صحت‌سنجی حاکی از دقت قابل قبول مدل (با میانگین خطای کمتر از ۶ درصد) در شرایط واقعی است.



شکل ۱۲- میزان تجمعی تولید آب شیرین و مرجع [۴۰]

۱۰- بررسی پارامترهای کلیدی

عملکرد VMED توسط چندین عامل کلیدی مهم، از جمله عوامل محیطی، استانداردهای طراحی و شرایط عملیاتی، تأثیر گذاشته



شکل ۱۳- رابطه هزینه آب بر حسب ظرفیت تولید شده، با استفاده از مدل رگرسیونی با مقیاس لگاریتمی

شکل ۱۳ رابطه بین هزینه آب و ظرفیت تولید در سیستم نمک‌زدایی خورشیدی را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش ظرفیت تولید و گذر زمان، هزینه متوسط هر لیتر آب کاهش یافته و به مقدار پایداری می‌رسد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن هزینه نصب اولیه ۱۵۰ میلیون تومان، هزینه نگهداری سالانه ۵ میلیون تومان و تولید روزانه ۳۶ لیتر در ۳۳۰ روز کاری در سال، قیمت تقریبی هر لیتر آب تولیدشده توسط سامانه پیشنهادی حدود ۲۶۴۵ تومان است. این مقدار برای سامانه‌های سنتی VMED حدود ۳۱۳۱ تومان برآورد می‌شود. بهره‌گیری از ساختار ترکیبی و فناوری‌های بازیافت انرژی، می‌تواند هزینه نهایی را به‌طور ملموس تا حدود ۵/۱۵ درصد کاهش دهد.

$$(19) \quad \text{قیمت هر لیتر} = \frac{\text{هزینه تولید} + (\text{هزینه نگهداری سالانه} \times \text{عمر مفید})}{\text{تعداد روزهای سال} \times \text{عمر مفید} + \text{تولید روزانه}}$$

۱۱- جمع بندی و نتیجه‌گیری

تحلیل عملکرد سیستم تقطیر عمودی چنداثره (VMED) مجهز به پنل‌های خورشیدی هیبریدی (PVT) و خنک‌کننده‌های ترموالکتریک نشان داد که این سیستم توانسته است بازده انرژی را به میزان ۲۵-۳۰٪ نسبت به سیستم‌های معمولی افزایش دهد. استفاده از فناوری ترموالکتریک در کاهش تلفات گرمایی و افزایش بازیابی انرژی نقش مؤثری ایفا کرد و بازده انرژی سیستم را تا ۱۸٪ بهبود داد. از دیدگاه اقتصادی، پیش‌گرم کردن آب شور هزینه تولید آب شیرین را تا ۲۵٪ کاهش داد و به بهینه‌سازی فرآیند کمک کرد. تحلیل‌ها نشان داد که افزایش تعداد مراحل تبخیر (Nt) تولید را تا ۴۰٪ افزایش داده، اما نقطه بهینه‌ای وجود دارد که هزینه‌ها و بازده را متعادل می‌کند. مشکلات عملیاتی نظیر گرفتگی خطوط تغذیه با طراحی مناسب و استفاده از مواد با کیفیت قابل کاهش است. این دستاوردها نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فناوری در مناطق کم‌آب و آفتابی برای تولید پایدار آب شیرین و انرژی است.

۱۲- مراجع

- [1] Zhang H, Li Y. Numerical and real-time experimental investigation of a three-effect evacuated tube solar still in China. Appl Energy. 2013;102:567-75.
- [2] Gui C, Fan K, Huang H, Liu P, Ren T, Zhang X, et al. A high-performance solar driven multistage desalination system by structural modification. ACS ES&T Water. 2025;5(2):629-38.
- [3] Manasrah A, Younes MB, Abdelhafez E. Sun-powered solutions: Investigating productivity and economics of small-scale solar desalination system. Case Stud Therm Eng. 2024;63:105262.
- [4] Mufthah AK, Zili-Ghedira L, Abugderah MM, Hassen W, Becheikh N, Alshammari BM, et al. Sustainable Water

می‌شود. در ادامه به جزئیات این پارامترها و تأثیر آن‌ها بر عملکرد VMED می‌رساند:

۱۰-۱- پارامترهای محیطی

بطور کلی تأثیر پارامترهای محیطی بر تولید آب شیرین در سامانه ترکیبی مورد بررسی بصورت ذیل در جدول ۴ ارائه می‌گردد.

جدول ۴- پارامترهای محیطی مؤثر در تولید آب شیرین

نور خورشید	دمای محیط	دمای آب ورودی	سرعت باد	فشار آب ورودی
افزایش تولید	بهبود تولید	افزایش تولید	کاهش تولید	کاهش تولید

برای بهبود تولید، استفاده از پوشش‌های دوگانه بر روی سطح جذب نور و به‌کارگیری آب یا هوای سرد بر روی آخرین صفحه تقطیر، به عنوان استراتژی‌های مؤثر پیشنهاد می‌شوند.

۱۰-۲- پارامترهای طراحی

تأثیر پارامترهای طراحی بر تولید آب شیرین در جدول ۵ ارائه می‌گردد:

جدول ۵- پارامترهای طراحی مؤثر در تولید آب شیرین

تعداد صفحات مؤثر (Nt)	فاصله صفحات (d)	زاویه انحراف صفحات (θ)	عوامل جزئی تر
افزایش تعداد صفحات موجب افزایش تولید تا حد بهینه می‌گردد (باید تعادل بین تولید و هزینه‌ها حفظ شود)	کاهش فاصله بین صفحات باعث افزایش تولید می‌شود، اما فاصله بسیار کم مشکلات انتقال گرما و جرم گیری بین صفحات را ایجاد می‌کند.	تنظیم زاویه صفحات می‌تواند تولید را بهبود بخشد، اما انحراف زیاد موجب مشکلات جریانی می‌شود.	تعداد و نوع فاصله‌گذارها، اندازه قطرات میعان، سطح صفحات، طراحی جمع‌کننده‌ها

بهینه‌سازی این پارامترها به بهبود تولید، کاهش هزینه‌ها، و اجرای کارآمدتر سیستم‌های تقطیر چنداثره منجر خواهد شد.

۱۰-۳- تحلیل اقتصادی سامانه پیشنهادی

تحلیل‌های پیشین نمونه‌های VMED نشان می‌دهد که هزینه تولید آب شیرین در نوع کلاسیک بین ۱۰ تا ۱۳/۳ دلار در هر تن و برای نسخه دارای حوضه بین ۱۶ تا ۱۹ دلار در هر تن است. این هزینه‌ها در مقایسه با روش‌هایی نظیر اسمز معکوس خورشیدی (۲/۱۸ تا ۱۸/۶۳ دلار در هر تن) همچنان بالا هستند. بنابراین، مطالعات آینده باید بر کاهش هزینه‌های تولید VMED و افزایش رقابت‌پذیری آن در بازار تمرکز کنند.

- [27] Sampathkumar K, Senthilkumar P. Utilization of solar water heater in a single basin solar still—An experimental study. *Desalination*. 2012;297:8-19.
- [28] Panchal H, Sathyamurthy R. Experimental analysis of single-basin solar still with porous fins. *Int J Ambient Energy*. 2020;41(1).
- [29] Velmurugan V, Gopalakrishnan M, Raghu R, Srithar K. Single basin solar still with fin for enhancing productivity. *Energy Convers Manag*. 2008;49(10):2602-8.
- [30] Abujazar MSS, Fatimah S, Kabeel AE. Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate. *Desalination*. 2017;423:141-8.
- [31] El-Agouz SA. Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation. *Energy Convers Manag*. 2014;86:186-93.
- [32] Singh P, Singh PP, Singh J, Singh RI. Performance evaluation of micro stepped solar still. *Int Conf Eng Manag*. 2013;16-20.
- [33] El-Sebaei AA, Yagmour SJ, Al-Hazmi FS, Faidah AS, Al-Marzouki FM, Al-Ghamdi AA. Active single basin solar still with a sensible storage medium. *Desalination*. 2009;249(2):699-706.
- [34] Sakthivel M, Shanmugasundaram S. Effect of energy storage medium (black granite gravel) on the performance of a solar still. *Int J Energy Res*. 2008;32(1):68-82.
- [35] Sharpley BF, Boelter LMK. Evaporation of water into quiet air: From a one-foot diameter surface. *Ind Eng Chem*. 1938;30(9):1125-31.
- [36] Aburideh H, Deliou A, Abbad B, Alaoui F, Tassalit D, Tigrine Z. An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka. *Procedia Eng*. 2012;33:475-84.
- [37] Castillo-Téllez M, Pilatowsky-Figueroa I, Sánchez-Juárez Á, Fernández-Zayas JL. Experimental study on the air velocity effect on the efficiency and fresh water production in a forced convective double slope solar still. *Appl Therm Eng*. 2015;75:1192-200.
- [38] Rashidi S, Rahbar N, Valipour MS, Esfahani JA. Enhancement of solar still by reticular porous media: Experimental investigation with exergy and economic analysis. *Appl Therm Eng*. 2018;130:1341-8.
- [39] 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.
- [40] Fernández J, Chargoy N. Multi-stage, indirectly heated solar still. *Sol Energy*. 1990;44(4):215-23.
- [41] Telkes M. Solar still construction. 1959.
- [42] Dsilva D, Rufuss W, Iniyan S, Suganthi L, Davies PA. Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016;63:464-96.
- [43] Reddy KS, Sharon H. Active multi-effect vertical solar still: Mathematical modeling, performance investigation and environmental analyses. *Desalination*. 2016;395:99-120.
- [44] Elango C, Gunasekaran N, Sampathkumar K. Thermal models of solar still—A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2015;47:856-911.
- [45] Selçuk MK. Design and performance evaluation of a multiple-effect, tilted solar distillation unit. *Sol Energy*. 1964;8(1):23-30.
- [46] Lim BJ, Yu SS, Park CD, Chung KY. One-dimensional numerical analysis of the effect of seawater feed rate on multi-effect solar stills. *Trans Korean Soc Mech Eng B*. 2016;40(7):477-84.
- [47] Tanaka H. Theoretical analysis of a vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a tilted wick still. *Desalination*. 2016;377:65-72.
- [48] Burgess G, Lovegrove K. Solar thermal powered desalination: Membrane versus distillation technologies. Centre for Sustainable Energy Systems, Australian National University; 2005.
- [49] Cooper PI. The maximum efficiency of single-effect solar stills. *Sol Energy*. 1973;15(2):205-17.
- Production: Solar Energy Integration in Multi-Effect Desalination Plants. *Water*. 2025;17(5):647.
- [5] Tang Y, Bai Y, Guo Q, He X, Li M, Zhang C, et al. Performance analysis and novel cross-flow scheme of low-temperature multi-effect distillation for treating high-mineralized mine water. *Water*. 2024;16(22):3254.
- [6] Kumar A, Tiwari GN. Thermal modeling of active triple basin solar still using flat plate collector. *Energy Convers Manag*. 1999;40(5):529-40.
- [7] Rai SN, Tiwari GN. Numerical simulation of multi-effect solar stills in India. *Sol Energy*. 1993;51(2):101-10.
- [8] Al-Hassan AM, et al. Experimental study of four-effect evacuated tube solar still in Middle Eastern climate. *Desalination*. 2010;253(1-3):45-52.
- [9] Silva VG, et al. Real-time performance of seven-effect solar still with flat plate collector in Brazil. *Desalination*. 2001;138(1-3):201-7.
- [10] Tanaka H, Nakatake Y. Field testing of a three-effect vacuum solar still in Japan. *Sol Energy*. 1998;65(3):167-72.
- [11] Al-Mashaqbeh I, Al-Hawary M. Steady-state modeling of three-effect vacuum solar stills under Middle Eastern conditions. *Energy*. 2000;25(8):693-700.
- [12] Rahman MM, et al. Three-effect vacuum solar still performance: numerical modeling and outdoor testing in Malaysia. *Renew Energy*. 2009;34(5):1204-10.
- [13] Sethi V, Singh Z. Modeling of multi-effect vacuum desalination coupled with flat plate collector in India. *Desalination*. 2012;295:42-9.
- [14] Toyama S, Aragaki T, Salah HM, Murase K, Sando M. Five-effect vertical solar still with basin: numerical modeling in Japan. *J Chem Eng Japan*. 1989;22(4):315-20.
- [15] Ebadi A, Bahiraei M, Yaghoubi M, Amidpour M. Performance assessment of a novel vertical multi-effect diffusion solar desalination system integrated with photovoltaic thermal collectors and nanofluids. *Desalination*. 2023;556:116511.
- [16] Elsherbiny SM, Fath HES. Thermal performance of a vertical solar still under Alexandria climate. *Renew Energy*. 1995;6(2):163-70.
- [17] El-Sebaei AA. Effect of wind speed on some designs of solar stills. *Energy Convers Manag*. 1998;39(3-4):467-77.
- [18] Toyama S, Aragaki T, Salah HM, Murase K, Sando M. Simulation of a multieffect solar still and the static characteristics. *J Chem Eng Japan*. 1987;20(5):473-8.
- [۱۹] خلیلی م، طاهری م، معین غلامی. مطالعه تجربی تأثیر استفاده از پارچه‌های جاذب بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلکانی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۳؛۵۲(۴):۹-۱۸.
- [۲۰] مهرانیور، آ، غانی، ه. هادی رحیمی. تحلیل انرژی و انرژی یک سیستم ترکیبی جدید تولید توان و آب شیرین، با ترکیب چرخه فوق بحرانی تراکم مجدد دی اکسید کربن و چرخه نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۳؛۵۲(۴):۱۹-۲۸.
- [۲۱] پاشاپور، م، جعفرمدار، ص، خلیل آریا ش. تحلیل انرژی-اقتصادی یک سیستم جدید برای تولید سه‌گانه‌ی توان، گرما و آب شیرین. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۲؛۵۲(۱):۱-۱۰.
- [۲۲] خوشگفتار منش چراغ، تولمی. مدل‌سازی ترمودینامیکی، انرژی و اکونومیک و انرژی محیط زیستی آب‌شیرین‌کن MED. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۱۹؛۴۹(۳):۱۲۷-۳۶.
- [۲۳] میرزایی ضیاپور، ب، مختاری زائر، رحیمی، م. مطالعه موردی سرمایه‌گذاری ساختمان به وسیله سردکن ترموالکتریک با تغذیه از منابع انرژی خورشیدی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۲؛۵۲(۱):۲۲۷-۳۶.
- [۲۴] اشجاری اقدم، س، سینی، جعفرمدار، خلیل‌آریا، چیت ساز خوبی عطا. شبیه‌سازی و بررسی پارامتری سیستم تولید سه‌گانه توان، گرما و تبرید با استفاده از سلول‌های خورشیدی متمرکز و خنک‌کننده ترموالکتریک. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۳؛۵۳(۱):۴۱-۹.
- [25] Kalogirou S. Seawater desalination using renewable energy sources. *Prog Energy Combust Sci*. 2005;31(3):242-81.
- [26] Kaviti AK, Yadav A, Shukla A. Inclined solar still designs: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016;54:429-51.