



تحلیل عددی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی تقطیر مستقیم کوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه شفاف

آرش مهدوی^۱، علی شاهنظری^{۲*}

دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دپارتمان مهندسی مکانیک، بابل، ایران
^۲استاد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی گروه مهندسی آب، ساری، ایران
 مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

چکیده

انرژی الکتریکی و آب شیرین دو نیاز اساسی بشر است که این نیاز با استفاده صحیح از انرژی خورشیدی مرتفع می‌گردد. هدف از این پژوهش، تعبیه دستگاه آب شیرین کن کوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه‌شفاف برای تولید الکتریسیته و آب شیرین بطور همزمان است. سیستم خورشیدی کوپل شده در محیط نرم افزار ANSYS Workbench 2022 شبیه‌سازی شد. سپس برای بررسی میزان بهره‌وری، سیستم در دماهای مختلف آب شور 60°C ، 70°C و 80°C و سرعت‌های متفاوت باد ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر بر ثانیه شبیه‌سازی شد؛ همچنین ده سناریو بر حسب شدت تشعشع و دمای آب شور تعریف و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای آب شور و همچنین سرعت باد موجب افزایش میزان تولید آب شیرین شد که اثر دمای آب شور در مقایسه با سرعت باد از این نظر بیشتر بود. برای سرعت باد 3 m/s با افزایش دمای آب شور از 60°C به 70°C و از 70°C به 80°C بطور متوسط میزان بهره‌وری، به ترتیب ۶۴٪ و ۱۲۰٪ افزایش یافت؛ همچنین افزایش توان الکتریکی خروجی سیستم برای دمای آب شور 70°C با افزایش سرعت باد از 1 m/s تا 5 m/s ، ۵۳٪/۱۰٪ بوده است. نتایج شبیه‌سازی در ده سناریو مختلف نشان داد که سیستم خورشیدی کوپل شده نسبت به سیستم خورشیدی مستقل در هشت مورد بهره‌وری بیشتری داشته است. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهاد می‌شود که مناطق جنوبی کشور با شدت تشعشع و سرعت باد بالا برای نصب سیستم خورشیدی کوپل شده مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر؛ انرژی خورشیدی؛ شبیه‌سازی عددی؛ ماژول خورشیدی نیمه‌شفاف.

Numerical analysis of direct distillation solar still coupled with a semitransparent photovoltaic module

Arash Mahdavi¹, Ali Shahnazari^{2*}¹Ph.D. student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran²Prof., Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Abstract

Clean electrical energy and freshwater are two basic human needs that can be met by using solar energy properly. In this article, the goal is to produce electricity and freshwater simultaneously by installing a solar still coupled with a semi-transparent solar module. The coupled solar system was simulated in ANSYS Workbench 2022 software environment. To check the water yield, the system was simulated at different brackish water temperatures of 60°C ، 70°C ، and 80°C and different wind speeds of 1, 2, 3, 4, and 5 m/s. Also, ten scenarios were defined and simulated according to radiation intensity and brackish water temperature. The results showed that the increase in brackish water temperature and the wind speed increased the amount of freshwater production, and the effect of brackish water temperature was greater compared to wind speed. By increasing the brackish water temperature from 60 to 70°C and from 70°C to 80°C ، the average water yield increment for the wind speed of 3 m/s is 64% and 120%, respectively. Also, by increasing the wind speed from 1 m/s to 5 m/s at 70°C ، the output power of the system increases by 10.53%. The simulation results in ten different scenarios showed that the coupled solar system was more efficient than the independent solar system in eight cases. According to the results of this research, it is suggested that the southern regions of the country with high radiation intensity and high wind speed should be considered for installing the coupled solar system.

Keywords: Renewable energy; Solar energy; Numerical simulation; Semitransparent photovoltaic module.

۱- مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی بشر را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. انرژی‌های تجدیدپذیر در بازه زمانی نسبتاً کوتاهی قابل استفاده مجدد هستند. انرژی‌های خورشیدی، باد، گرمایش زمین، موج، زیست توده و هیدروژن همگی جزء انرژی‌های تجدیدپذیر هستند [۱]. در میان تمامی انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی خورشیدی به دلیل داشتن مزایایی مثل هزینه کم تبدیل آن به الکتریسیته و در دسترس بودن همه روزه و گسترده، آن را متمایز و محبوب ساخته است. به همین دلیل مطالعات گسترده‌ای در زمینه انرژی خورشیدی انجام شده است که از آن به عنوان انرژی پاک برای تولید الکتریسیته و تبدیل آب شور به شیرین استفاده شده است.

برخی از محققان عملکرد دستگاه‌های خورشیدی مختلف را ارزیابی کردند. رهبر و اصفهانی [۲] با تکنیک‌های نظری و عددی بهره‌وری یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی ساده شیبدار را تعیین کردند. آنها با شبیه‌سازی عددی روندهای مشابهی را برای میزان تولید آب و ضریب انتقال حرارت همرفتی با موارد تجربی گزارش کردند. الاغوز و همکاران [۳] عملکرد یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی شیبدار را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که بهره‌وری دستگاه آب شیرین کن خورشیدی با کاهش جرم آب و افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد. رهبر و همکاران [۴] بهره‌وری آب و ضریب انتقال حرارت همرفتی را در یک دستگاه ثابت خورشیدی لوله‌ای تخمین زدند. آنها گزارش کردند که با افزایش دمای شیشه به مقدار ۵ درجه سانتیگراد، بهره‌وری ۲۰٪ کاهش می‌یابد. رشیدی و همکاران [۵] بصورت عددی به مدل‌سازی دو فازی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پرداختند. آنها از نانوسیال Al_2O_3 و آب برای افزایش نرخ بهره‌وری استفاده کردند. نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی نانو ذره از ۰٪ به ۵٪ میزان بهره‌وری ۱۸٪ افزایش یافت. سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک در تحقیق همت و طقرایی [۶] به کار گرفته شد. با کوپل کردن سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک به دستگاه آب شیرین کن خورشیدی میزان تولید آب بین ۱۵٪ تا ۶۲٪ افزایش یافت. آنها، مطالعه دیگری را برای آب شیرین کن خورشیدی در استان خوزستان انجام دادند و نتیجه گرفتند که راهبرمز، دهدز و ایزه با توجه به سرعت باد بهترین نقاط برای بهره‌برداری هستند [۷]. ادیبی و همکاران [۸] طرح نوینی از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی به صورت پله‌ای با ماده تغییر فاز دهنده ارائه دادند. طرح پله‌ای جدید با ماده تغییر فاز دهنده اسید استتاریک، میزان آب تولیدی را به مقدار ۴۳٪ نسبت

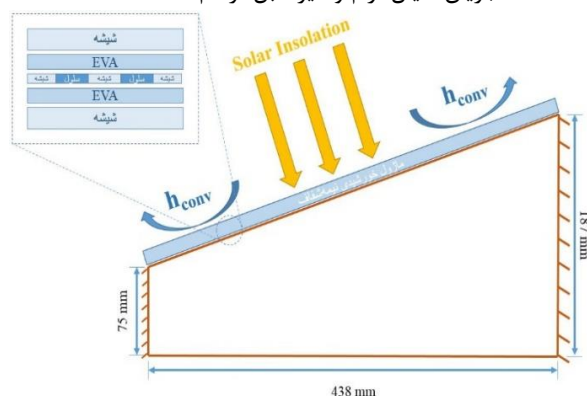
به طرح بدون شیب افزایش داد. خالد سلیم و همکاران [۹] از ماده تغییر فاز دهنده RT42 جهت افزایش نرخ تولید آب شیرین در حل عددی خود استفاده کردند. رایهاناندا و همکاران [۱۰] مدل شناوری از دستگاه آب شیرین کن خورشیدی را ارائه دادند که کاملاً از مواد ساده محلی در دسترس ساخته شده بود. آنها مدل ریاضی طرح را نیز پیشنهاد دادند که نتایج مدل ریاضی و تجربی مطابقت خوبی داشته است. نیان و همکاران [۱۱] برای بیشتر کردن میزان تولید آب از مواد تغییر فاز دهنده استفاده کردند که منجر به افزایش ۲۸٪ شد. شعیبی و همکاران [۱۲] از نانوسیال برای خنک‌کاری شیشه تقطیر و همچنین گرم کردن آب شور برای تبخیر بهتر استفاده کردند. استفاده همزمان دو جاذبه از نانوذرات ایده هوشمندانه‌ای بود که میزان تولید آب را بین ۴٪ تا ۱۱٪ افزایش داد. در کار تجربی آنها ترموالکتریک مورد استفاده قرار گرفت و با یک مدل ریاضی مقایسه شد. بعضی از محققین برای بهبود عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی از صفحات عمودی در دستگاه برای تغییر هندسه سیستم استفاده کردند. سراج و همکاران [۱۳] بصورت تجربی و عددی به بررسی عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی همراه با تیغه منحرف کننده جریان سیال پرداختند. آنها گزارش کردند، انتخاب ارتفاع مناسب و محل قرارگیری تیغه موجب افزایش حدود ۲۰٪ آب شیرین می‌شود؛ همچنین استفاده از تیغه با جنس مواد نیمه شفاف و ضریب هدایت حرارتی کم برای جلوگیری از اتلاف حرارتی در سیستم را پیشنهاد دادند. محققان دیگری از تیغه‌های مختلف داخل دستگاه‌های خورشیدی برای افزایش بهره‌وری استفاده کردند. رشیدی و همکاران [۱۴] از تیغه برای افزایش عدد متوسط ناسلت که خود منجر به افزایش بهره‌وری سیستم است استفاده کردند. آنها اندازه و مکان قرار گرفتن تیغه را بهینه‌سازی کردند. السبایی و همکاران [۱۵] اثر پیکربندی تیغه را بر بهره‌وری دستگاه آب شیرین کن خورشیدی تک مخزنی بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که بهره‌وری خورشیدی صفحه پره‌دار با افزایش ارتفاع تیغه افزایش یافته و با افزایش تعداد و ضخامت تیغه کاهش می‌یابد. راجاسینیواسان و سرتار [۱۶] از تیغه‌های دایره‌ای و مربعی در مخزن یک دستگاه آب شیرین کن استفاده کردند. مطالعه آنها بهره‌وری بالاتری را برای تیغه‌های پوشیده شده با پارچه نشان داد. آنها عملکرد یکسانی را برای تیغه‌های دایره‌ای و مربعی مشاهده کردند. برخی از محققان از تکنیک‌های بهینه‌سازی در ایستگاه‌های خورشیدی مختلف استفاده کردند. مشالی و همکاران [۱۷] عملکرد ثابت خورشیدی را با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهینه کردند. نتایج محاسبه شده نشان داد که مدل

با توجه به پیشینه مطالعات انجام شده، ارزیابی محدودی در مورد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی کوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه شفاف انجام شده و تاکنون شبیه سازی عددی صفحات فتوولتاییک نیمه شفاف کوپل شده با دستگاه آب شیرین کن خورشیدی انجام نشده است؛ لذا هدف از این پژوهش، ارائه مدل کوپل شده از این دو سیستم خورشیدی و ارزیابی عملکرد آن تحت شرایط مرزی مختلف بوده است. برای این منظور، مراحل شبیه سازی در محیط نرم افزار ANSYS Fluent 2022 انجام شده است.

۲- تعریف مسئله

هندسه دو بعدی مسئله همراه با ابعاد و اندازه و شرایط مرزی اعمال شده در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، دو سلول خورشیدی تک بلوره با بازده ۲۰٪ و اندازه ۱۲۵ mm در ماژول خورشیدی نیمه شفاف در نظر گرفته شده است. ابعاد هندسی و خواص نوری ماژول خورشیدی نیمه شفاف در جدول ۱ خلاصه شده است [۲۴، ۲۵]. با توجه به شرایط مرزی اعمال شده، فرضیات ساده شونده زیر در نظر گرفته شده است:

۱. دیواره های جانبی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی عایق است.
۲. قسمت پایین دستگاه که آب شور وجود دارد دمای ثابتی دارد.
۳. دیواره های جانبی ماژول خورشیدی کدر و آدیاباتیکی هستند.
۴. مسئله در حالت پایدار حل شده است.
۵. جریان سیال آرام و غیر قابل تراکم است.



شکل ۱- هندسه دو بعدی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی به همراه ماژول خورشیدی نیمه شفاف

(ANN) برای پیش بینی عملکرد دستگاه آب شیرین کن دقت بالایی با خطای ناچیز دارد. ال-مقلانی [۱۸] هندسه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی دارای دو سطح شیب دار را برای جذب حداکثر انرژی خورشیدی بهینه کرد.

در خصوص ترکیب صفحات خورشیدی همراه با دستگاه آب شیرین کن خورشیدی مطالعات محدود با عملکرد مشابهی انجام شده که عمدتاً از صفحات خورشیدی برای پیش گرمایش آب شور استفاده شده است. یک نمونه از این کار مربوط به کار ساهتا و همکاران [۱۹] است. آنها با استفاده از نانوسیال آب-CuO بهره‌وری بالاتری را در مقایسه با نانوسیالات آب به همراه Al_2O_3 و TiO_2 مشاهده کردند. آرورا و همکاران [۲۰] به صورت تحلیلی به مطالعه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی همراه با کلکتورهای خورشیدی مجهز به بازتاب کننده سهموی پرداختند. آنها از مبدل حرارتی ماریچی مجهز به نانوذره کربن جهت افزایش نرخ بهره‌وری استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نانوذره نرخ بهره‌وری را بین ۲۸٪/۱ الی ۶۵٪/۷ افزایش می‌دهد. ایسا و همکاران [۲۱] از صفحات خورشیدی برای تولید الکتروسیسته و پیش گرمایش آب شور ورودی به مخزن دستگاه آب شیرین کن خورشیدی استفاده کردند. نتایج نشان داد، ظرفیت تولید آب شیرین دستگاه آب شیرین کن خورشیدی هیبریدی با صفحات خورشیدی $12/1 \text{ L/m}^2$ دستگاه آب شیرین کن خورشیدی مستقل $3/35 \text{ L/m}^2$ است. این نوع از طرح‌ها اگرچه عملکرد مطلوبی دارند، اما نیازمند فضای زیادی نیز هستند.

در مطالعات فوق صفحات خورشیدی بکار گرفته شده در مجاورت دستگاه آب شیرین کن خورشیدی بوده که نیاز به فضای وسیع‌تری دارند. در تحقیقات دیگر برای رفع محدودیت فوق، ماژول یا صفحه خورشیدی را با دستگاه آب شیرین کن خورشیدی کوپل کرده‌اند. مزراعه و همکاران [۲۲] به بررسی عملکرد دستگاه آب شیرین کن خورشیدی پرداختند که ماژول خورشیدی نیمه شفاف به جای سقف شیشه‌ای شیب دار در دستگاه آب شیرین کن خورشیدی قرار گرفت؛ همچنین از ماده تغییر فاز دهنده برای افزایش تولید روزانه آب شیرین استفاده شد. نتایج نشان داد که با وجود ماده تغییر فاز دهنده ۲۰٪ آب شیرین تولیدی نسبت به حالت شاهد افزایش یافت. سایینی و همکاران [۲۳] نیز به بررسی سیستم آب شیرین کن خورشیدی کوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه شفاف پرداختند. فاکتور بسته‌بندی که نشان دهنده تراکم سلول‌های خورشیدی در ماژول خورشیدی است، به عنوان پارامتر اصلی برای کنترل تولید الکتروسیسته بیشتر یا آب بیشتر مورد بررسی قرار گرفت.

شفاف اعمال شد و دو سیستم فوق مقایسه و مورد بحث قرار گرفتند.

جدول ۲- سناریوهای معرفی شده بر اساس دمای آب شور و شدت تشعشع خورشید

سناریو	دمای آب شور (°C)	شدت تشعشع (W/m ²)
۱	۴۰	۲۵۰
۲	۵۰	
۳	۴۰	۵۰۰
۴	۵۰	
۵	۶۰	
۶	۵۰	۷۵۰
۷	۶۰	
۸	۶۰	۱۰۰۰
۹	۷۰	
۱۰	۸۰	

۳- معادلات حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر مسئله شامل پیوستگی، مومنتوم، انرژی، تشعشع (DO) و غلظت است. همه علائم بکار رفته در معادلات در بخش ۶ (فهرست علائم) معرفی شده است. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

معادله مومنتوم در جهت X:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

معادله مومنتوم در جهت Y:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho \beta_g (T - T_0) + \rho \beta_c (C - C_0) \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_h \quad (5)$$

در معادله انرژی یک ترم چشمه وجود دارد که با حل همزمان معادله تشعشع (DO) تعیین می‌شود. در مدل تشعشع DO شدت تشعشع تابعی از مکان و جهت فرض می‌شود.

با رجوع به ماتایی و همکاران [۲۶]، بازده سلول خورشیدی تک‌بلوره از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} \left(1 - \beta_{ref} (T_{cell} - T_{ref}) + 0.085 \ln \left(\frac{I_{solar}}{I_{ref}} \right) \right) \quad (1)$$

جدول ۱- خواص نوری و ترموفیزیکی مازول خورشیدی نیمه-شفاف [۲۴، ۲۵]

مواد	ضخامت (mm)	چگالی (kg/m ³)	ضریب رسانش گرمایی (W/m.K)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
شیشه	۳	۳۰۰۰	۲	۵۰۰
EVA	۰/۵	۹۶۰	۰/۳۵	۲۰۷۰
سلول	۰/۲	۲۳۳۰	۱۴۸	۶۷۷
شیشه	۰/۴	۰/۴	ضریب جذب	ضریب عبور
EVA	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۰۹
سلول	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۲

بر اساس فرضیاتی که انجام شده است، شرایط مرزی را می‌توان بسته به پارامترهای عملیاتی مانند شدت تشعشع خورشید و دمای آب طبقه‌بندی کرد. مقادیر شدت تشعشع خورشیدی که در نظر گرفته شده است، در محدوده ۲۵۰-۱۰۰۰ (W/m²) می‌باشد. دمای آب شور بین ۴۰-۸۰ °C در نظر گرفته شده است. شدت تشعشع را تقسیم‌بندی کرده و چهار حالت مختلف با مقادیر ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ (W/m²) در نظر گرفته می‌شود؛ همچنین دمای آب شور با مقادیر ۴۰ °C، ۵۰ °C، ۶۰ °C، ۷۰ °C و ۸۰ °C اعمال می‌شود. بر این اساس، ۱۰ شرایط مرزی مختلف وجود دارد که در جدول (۲) خلاصه شده است. منطبق در نظر گرفته شده در سناریوهای طبقه‌بندی شده دمای شیشه است که نباید از مقدار دمای آب تجاوز کند (در غیر این صورت، مفهوم آب‌شیرین‌کن خورشیدی بی‌معنی است). از این رو، پس از شبیه‌سازی و پردازش، برخی از سناریوهای موردی که مناسب نبود، گزارش نشده است. لازم به ذکر است که ۱۰ سناریو برای شرایط مرزی مختلف برای هر دو سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی با و بدون مازول PV نیمه

$$\dot{Q}_{ev} = h_{ev}(T_w - T_g) \quad (16)$$

خصوصیات هوای مرطوب که تابعی از میانگین دما است از جدول ۵ در قسمت پیوست محاسبه می‌شود [۲۸]. از آنجا که مدل دانکل در تخمین ضریب انتقال حرارت تبخیری حدود ۳۰٪ خطا دارد، شفق و فرید [۲۹] رابطه تجربی دیگری را ارائه دادند که مبنی بر معادله چیلتن-کولبرن است:

$$Nu = 0.051Ra^{1/3} \quad (17)$$

که در آن:

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta c_p H^3 \Delta T'}{k \mu}, \quad H = \frac{(H_l + H_r)}{2} \quad (18)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با معادله ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$h_{ev} = \frac{Nu \times k}{H} \quad (19)$$

عدد متوسط ناسلت و نرخ تولید آب شیرین که از محاسبات عددی بدست آمده از روابط زیر محاسبه شده است:

$$\overline{Nu} = \frac{-H}{L(T_w - T_g)} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{water} dx \quad (20)$$

$$\dot{m}_{hourly} = \frac{-3600 \times D_{AB}}{L_w} \int_0^L \frac{\partial(\rho C)}{\partial y} \Big|_{water} dx \quad (21)$$

معادلات انرژی در لایه‌های مختلف ماژول خورشیدی نیمه‌شفاف بصورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho_i C_{p_i} T_i)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i) - \gamma \dot{e}_{elec} + S_h \quad (22)$$

ضریب جذب (l) از معادله زیر بدست می‌آید:

$$a = \left(\frac{1}{t_{thickness}} \right) \ln \left[\frac{(1-r)^2}{2\tau} + \sqrt{\frac{(1-r)^4}{4\tau^2} + r^2} \right] \quad (23)$$

با قرار دادن ضریب جذب در معادله (۶)، می‌توان شدت تشعشع را بدست آورد و سپس به عنوان یک ترم چشمه در معادله ۲۲ جاگذاری کرد. در معادله ۲۲، "i" بیانگر لایه‌های مختلف سلول خورشیدی است. به پارامتر " γ "، عدد ۱ و صفر بترتیب، برای لایه

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

با حل معادله بالا و تعیین شدن شدت تشعشع، ترم چشمه بدست می‌آید:

$$S_h = -\nabla \cdot q^R = \nabla \cdot \int_0^{+\infty} q_v^R dv \quad (7)$$

q_v^R شار تابشی طیفی است که از یک سطح عبور می‌کند:

$$q_v^R = \vec{q}_v^R \cdot \vec{n} = \int_{4\pi} I_v \vec{n} \cdot \vec{s} d\Omega \quad (8)$$

معادله غلظت نیز از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} \right) = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

معادلات تجربی حاکم بر مسئله برای تعیین ضریب انتقال حرارت تبخیری شامل موارد زیر است:

$$h_{ev} = 0.016273 \times h_c \times \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (10)$$

که در آن [۲]:

$$h_c = 0.884 \times (\Delta T')^{1/3} \quad (11)$$

$$\Delta T' = \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273.15)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right] \quad (12)$$

$$P_w = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273.15} \right) \quad (13)$$

$$P_g = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273.15} \right) \quad (14)$$

همچنین میزان آب شیرین بدست آمده برابر است با [۲۷]:

$$\dot{m}_{hourly} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{h_{fg}} \times 3600 \times A_s, \quad A_s = 438 \times 452.09 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

که در آن،

گرفت. مقایسه نتایج حل عددی تحقیق حاضر و مطالعه [۳۱] در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳- مقایسه پارامتر نرخ تولید آب شیرین حل عددی تحقیق حاضر با مطالعه تجربی [۳۱]

T_w (°C)	T_g (°C)	\bar{x} (cm)	زاویه شیب	نرخ تولید آب عددی ($\frac{kg \cdot h}{m^2}$)	نرخ تولید آب آزمایشگاهی [۳۱] ($\frac{kg \cdot h}{m^2}$)
۴۶	۱۰	۱۵/۵	۷/۳	۰/۷۲	۰/۶۴
۶۳	۴۶	۱۶/۵	۱۴/۳۵	۰/۵۸	۰/۵۴
۸۳	۶۳	۲۴	۱۴/۳۵	۱/۲۱	۱/۳۲

۴-۲- استقلال از شبکه در ANSYS Fluent

در خصوص استقلال از شبکه، از عدد متوسط ناسلت استفاده شد و نتایج آن در جدول ۴ آورده شد. با افزایش تعداد شبکه از ۵۰۰۰۰، مقدار عدد متوسط ناسلت تقریباً ثابت ماند و تغییری نکرد. خطای نسبی تعداد شبکه‌های مختلف نیز با هم مقایسه شد. مقدار متوسط عدد ناسلت بدست آمده از مدل چیلتن-کولبرن با تعداد ۴۹۸۸۱ شبکه، ۷ بوده است که کمترین فاصله را با این نتایج دارد؛ لذا، با عدد شبکه فوق، بقیه محاسبات ادامه داده شد.

جدول ۴- مقایسه استقلال از شبکه بر حسب عدد متوسط ناسلت

تعداد المان شبکه	عدد متوسط ناسلت	خطای نسبی (%)
۱۶۷۴۹	۲/۸۱۷۹	۵۹/۷۴
۱۹۴۲۸	۴/۹۶۵۸	۲۹/۰۵
۲۵۴۵۲	۴/۸۵۱۰	۳۰/۶۹
۴۹۸۸۱	۶/۸۴۸۳	۲/۱۶
۹۰۰۵۴	۶/۱۲۷۹	۱۲/۴۵

۴-۳- مقایسه دستگاه آب شیرین کن خورشیدی گوپل شده با دستگاه آب شیرین کن خورشیدی مستقل

یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی بدون ماژول PV نیمه شفاف شبیه‌سازی شد تا بتوان آن را با سیستم گوپل شده مقایسه کرد. پارامتر اصلی برای مقایسه این دو سیستم میزان تولید آب شیرین بود. برای دستگاه خورشیدی بدون ماژول PV نیمه شفاف، مساحت خالص سطح آب شور، معادل مساحت لایه شیشه‌ای منهای سلول-های خورشیدی (با توجه به جذب کامل شدت تشعشع خورشیدی)

سلول خورشیدی و دیگر لایه‌ها اختصاص می‌یابد. از معادله ۲۴، " \dot{e}_{elec} " بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{e}_{elec} = \frac{E_{elec}}{V_{cell\ layer}} = \frac{(\alpha_{cell} \tau_{glass} I_{solar}) \eta_{PV}}{t_{cell\ layer}} \quad (24)$$

در نهایت نیز ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی که تابعی از سرعت باد است از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۰].

$$h_c = 5.7 + 3.8v_w \quad (25)$$

شرایط مرزی مسئله به صورت زیر است:

$$\text{در قسمت شیشه تقطیر:} \quad u = 0, v = 0, C = 0 \quad (26)$$

در قسمت آب شور:

$$u = 0, v = 0, T = T_w, C = 1 \quad (27)$$

در دیوارهای جانبی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی:

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (28)$$

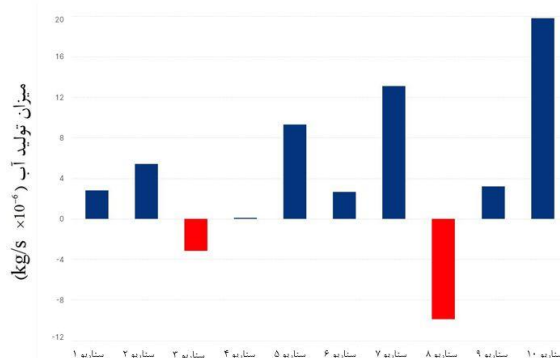
۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی

شبیه‌سازی دو بعدی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی با یک سطح شبیدار توسط نرم‌افزار ANSYS Fluent انجام شد. از روش SIMPLE برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت استفاده شد. برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، گونه‌ها، انرژی و تشعشع از روش Upwind درجه اول و برای گسسته سازی فشار از روش PRESTO استفاده شده است. پارامتر نرخ تولید آب شیرین بدست آمده از معادله ۲۱ برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شد. با توجه به پایدار بودن شرایط، از مطالعه تجربی تیواری و همکاران [۳۱] برای صحت‌سنجی نتایج تحقیق حاضر استفاده شد. در تحقیق تیواری و همکاران [۳۱]، دستگاه آب شیرین کن خورشیدی در دماهای ثابت آب شور $10^\circ C$ ، $46^\circ C$ ، $63^\circ C$ و $83^\circ C$ و شیشه تقطیر به ترتیب $10^\circ C$ ، $46^\circ C$ و $63^\circ C$ مورد آزمایش قرار گرفت. دمای شیشه تقطیر برای آب شور $46^\circ C$ با یک لایه یخ پوشیده شده در دمای $10^\circ C$ ثابت نگاه داشته شد. با توجه به ثابت بودن دماهای آب شور و شیشه تقطیر، میزان تولید آب شیرین بدست آمده از نتایج تحقیق فوق، با حل عددی تحقیق حاضر مورد مقایسه و ارزیابی قرار

که دلیل آن این است که با دمای بالاتر آب، هوای مرطوب داخل دستگاه خورشیدی گرم تر می‌شود، بنابراین سلول‌های خورشیدی با راندمان پایین‌تری کار می‌کنند و در نتیجه توان خروجی کاهش می‌یابد؛ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که توان الکتریکی خروجی متناسب با شدت خورشید است. از دیدگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی، افزایش دمای آب شور اهمیت بسزایی در تولید آب شیرین دارد. از این رو، شدت تشعشع خورشید ممکن است، ظاهراً با میزان آب شیرین تولید شده ارتباطی نداشته باشد، اما تأثیر مهم آن با افزایش دمای آب شور، مطرح است. به عنوان مثال، با مشاهده موارد ۱ و ۲ می‌توان استنباط کرد که با افزایش دمای آب از $40^{\circ}C$ به $50^{\circ}C$ ، میزان بهره‌وری تولید آب شیرین حدود ۲۴۵ درصد افزایش می‌یابد. حال، اگر دمای آب ثابت فرض شود (مثلاً $50^{\circ}C$) و شدت خورشید تغییر کند، با افزایش شدت خورشید، بهره‌وری آب کاهش می‌یابد؛ زیرا دمای شیشه در تابش بالاتر بیشتر می‌شود. این یک نتیجه مهم است که نشان می‌دهد یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با دمای پایین اولیه می‌تواند تأثیر منفی بر تولید آب شیرین داشته باشد، زیرا اگر آب شور سرد باشد و شدت تشعشع خورشید زیاد باشد، دمای شیشه به سرعت افزایش می‌یابد، در نتیجه نرخ تقطیر کاهش می‌یابد. در مقایسه موارد ۲ و ۴ که در آن دمای ثابت آب شور $50^{\circ}C$ است و تابش خورشیدی متفاوت است، اگر تابش خورشیدی از 250 W/m^2 به 500 W/m^2 افزایش یابد، بهره‌وری حدود ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. متعاقباً اگر موارد ۴ و ۶ با شدت 500 W/m^2 و 750 W/m^2 خورشیدی مقایسه شود، می‌توان دریافت که بهره‌وری حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. دمای آب شور در این دو حالت یکسان و شدت تشعشع برای سناریو ۶ بیشتر از ۴ بود که در نتیجه دمای شیشه تقطیر بیشتر و میزان تولید آب شیرین کمتر شد؛ بنابراین، افزایش دمای آب شور و حفظ آن، در سطوح بالاتر شدت تشعشع در طول عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی بسیار مهم است.

در نظر گرفته شد. بهره‌وری هر دو سیستم برای مواردی با شدت-های تشعشع (250 W/m^2) ، (500 W/m^2) ، (750 W/m^2) و (1000 W/m^2) محاسبه شد و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. از شکل ۴ که تفاوت میزان تولید آب شیرین دو دستگاه مستقل و کوپل شده را نشان می‌دهد، می‌توان دریافت که به جز دو مورد (۳ و ۸)، عملکرد سیستم کوپل شده بهتر از دستگاه خورشیدی مستقل بوده است. دلیل آن، اختلاف دمای بین سطوح تقطیر شیشه‌ای و آب شور است. برای دستگاه خورشیدی مستقل، گرادیان دما بین سطوح آب و شیشه در همه موارد بالاتر از سیستم یکپارچه است. با این حال، برای موارد شماره ۳ و ۸ اختلاف دمای سیستم مستقل چهار برابر بیشتر از سیستم یکپارچه است؛ بنابراین، بهره‌وری آب در دو سناریو فوق بیشتر خواهد بود. با این وجود، اگر دمای آب شور افزایش یابد، تولید آب شیرین سیستم کوپل شده می‌تواند در آن شرایط بهتر باشد. روش‌های مختلفی برای افزایش دمای آب شور وجود دارد؛ مانند استفاده از مواد تغییر فازدهنده، کلکتورهای خورشیدی و غیره.

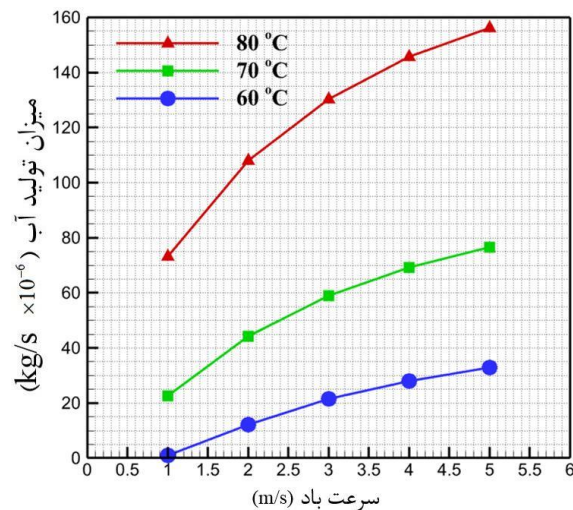


شکل ۲- تفاوت بهره‌وری آب بین یک دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مستقل با یک دستگاه آب‌شیرین‌کن کوپل شده با PV نیمه‌شفاف

۴-۴- میزان بهره‌وری و توان الکتریکی خروجی سیستم کوپل شده در سناریوهای متفاوت
توان الکتریکی خروجی و همچنین بهره‌وری آب برای همه موارد سیستم یکپارچه، در شکل ۳ محاسبه و نشان داده شده است. از شکل ۳ می‌توان دریافت که در یک شدت خورشیدی برابر، با افزایش دمای آب شور توان خروجی به مقدار کمی کاهش می‌یابد

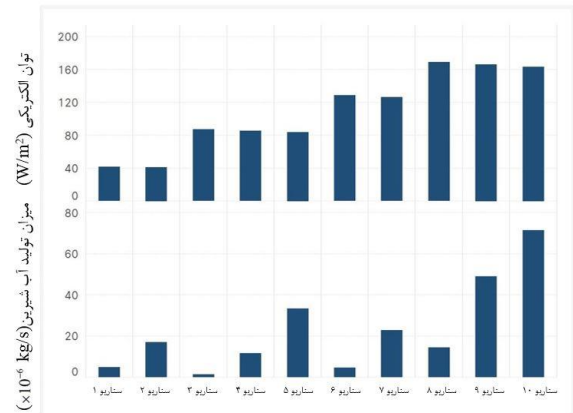
۴-۶- تاثیر سرعت باد بر عملکرد دستگاه خورشیدی گوپل شده

تاثیر سرعت باد و دمای آب بر میزان تولید آب شیرین دستگاه آب شیرین کن خورشیدی گوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه شفاف در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش سرعت باد به دلیل کاهش دمای سقف شیشه‌ای تقطیر ماژول، میزان تولید آب شیرین به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش دمای آب شور منجر به افزایش تولید آب شیرین تا چند برابر می‌شود. نکته قابل توجه این است که میزان افزایش تولید آب شیرین به طور متوسط برای دماهای ۶۰ به ۷۰ و ۷۰ به ۸۰ °C به ترتیب ۶۴٪ و ۱۲۰٪ است. این امر نشان می‌دهد که در دماهای بالاتر آب شور، افزایش سرعت باد تاثیر بیشتری بر میزان تولید آب شیرین دستگاه آب شیرین کن خورشیدی گوپل شده داشته است.



شکل ۵- تاثیر سرعت باد بر میزان تولید آب شیرین

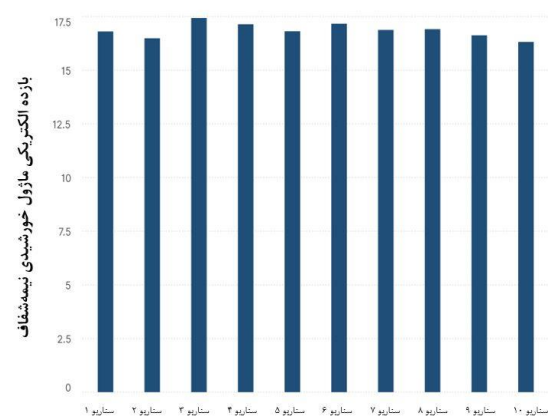
برای درک بهتر پدیده‌هایی که در دستگاه خورشیدی گوپل شده در حالت جریان پایدار برای سرعت باد متفاوت رخ می‌دهد، کانتورهای دمای سیستم مورد نظر با دمای آب شور ۷۰ °C در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش سرعت باد، ماژول خورشیدی نیمه شفاف خنک شده و میزان تقطیر بخار آب در شیشه تقطیر افزایش می‌یابد. در ناحیه مربوط به ماژول خورشیدی نیمه شفاف دو ناحیه گرم‌تر وجود دارد که مربوط به قسمت‌هایی است که سلول خورشیدی با ضریب جذب بالا قرار دارد. در هر ۵ کانتور نشان داده شده، ۴ ناحیه گردابه وجود دارد که تحت تاثیر تبخیر و تقطیر ایجاد می‌شود. برای تعیین جهت چرخش این گردابه‌ها نیاز



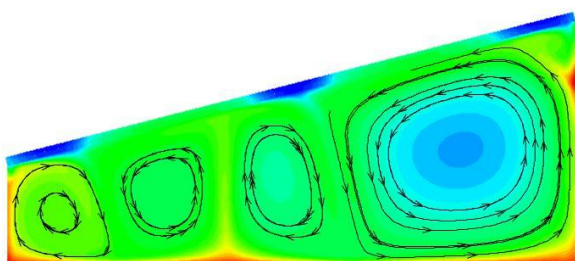
شکل ۳- توان الکتریکی خروجی و میزان تولید آب برای سناریوهای مختلف

۴-۵- بازده ماژول خورشیدی نیمه شفاف در سناریوهای متفاوت

بازده الکتریکی ماژول خورشیدی نیمه شفاف برای ده سناریو در شکل ۴ نمایش داده شده است. از شکل ۴ می‌توان دریافت که در شدت تشعشع‌های ثابت بازده ماژول خورشیدی نیمه شفاف با افزایش دمای آب شور کم می‌شود، یعنی به ازای هر ۱۰ °C افزایش دمای آب شور بازده ماژول ۰/۳٪ کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین از شکل زیر می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بازده ماژول برای همه سناریوها در بازه ۱۶٪-۱۷/۵٪ قرار می‌گیرد.

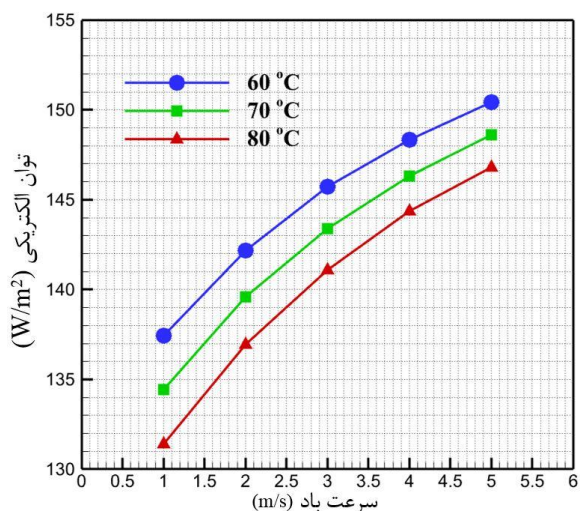


شکل ۴- بازده ماژول خورشیدی نیمه شفاف در سناریوهای مختلف



شکل ۷- کانتور دمای سیستم کوپل شده خورشیدی به همراه خطوط جریان

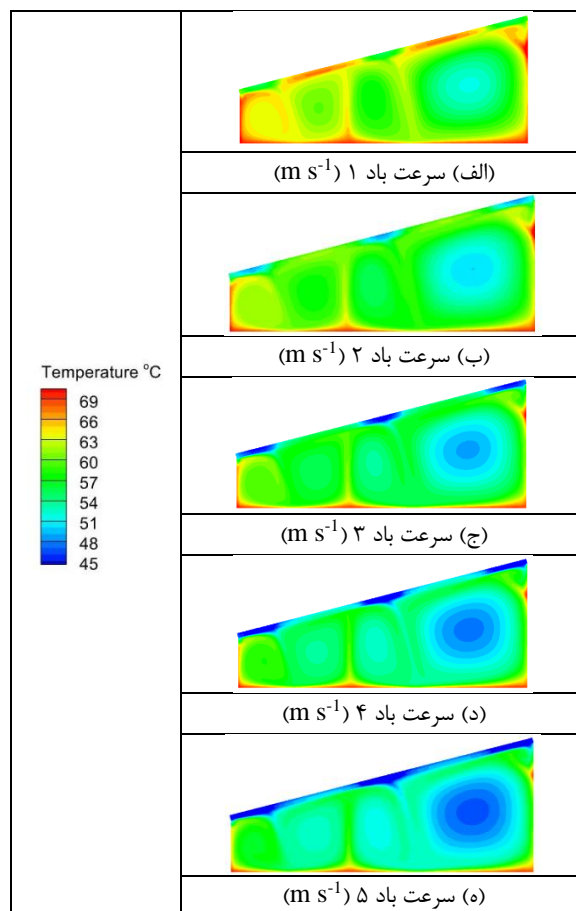
با افزایش سرعت باد فقط میزان تولید آب شیرین افزایش پیدا نمی‌کند، بلکه با خنک شدن ماژول خورشیدی نیمه‌شفاف توان الکتریکی خروجی سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند. شکل ۸ تاثیر سرعت باد و دمای آب شور را بر توان الکتریکی خروجی نشان می‌دهد. با افزایش دمای آب شور به ازای هر 10°C ، توان الکتریکی به طور میانگین ۲٪ کاهش پیدا می‌کند، در صورتی که با افزایش سرعت باد از 1 m/s به 5 m/s برای دماهای آب شور، از 60°C به 70°C و از 70°C به 80°C توان الکتریکی به طور متوسط ۱/۶٪ افزایش می‌یابد؛ همچنین برای دمای میانگین آب شور 70°C با افزایش سرعت باد از 1 m/s به 5 m/s ، توان الکتریکی خروجی ۱۰/۵٪ افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۸- توان الکتریکی خروجی به ازای واحد سطح در دماهای مختلف آب شور و سرعت‌های متفاوت باد

۵- جمع‌بندی

به رسم خطوط جریان آنها بوده که در شکل ۷ نشان داده شده است. جهت چرخش گردابه‌هایی مخالف است که در مجاورت هم قرار دارند. تعداد گردابه‌های ایجاد شده نشان دهنده میزان انتقال حرارت تبخیری است. گردابه‌های بیشتر در دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی نشان دهنده نرخ بیشتر تولید آب شیرین است؛ همچنین، خطوط دمایی نشان می‌دهد که گرادیان شدیدی در نزدیکی سطح شیشه یا آب به ترتیب به دلیل پدیده تقطیر یا تبخیر، وجود دارد. این تغییرات همچنین در نزدیکی دو گردابه مجاور به دلیل گرادیان سرعت قابل مشاهده است. گرادیان سرعت تاثیر خود را بر روی خطوط دما نیز نشان خواهد داد. تعداد و جهت چرخش گردابه‌ها که تحت تاثیر نسبت ابعاد دستگاه خورشیدی است، نقش مهمی در سرعت انتقال گرما و جرم دارد. به همین علت اضافه کردن تیغه‌های عمودی در سیستم با افزایش گردابه‌ها می‌تواند موجب افزایش میزان تولید آب شیرین شود.



شکل ۶- کانتور دمای سیستم خورشیدی کوپل شده در سرعت بادهای متفاوت

سرعت سیال در مختصات کارتزین، ($m s^{-1}$)	u, v, w	در این پژوهش، دو سیستم مجزای آب شیرین کن خورشیدی و ماژول خورشیدی نیمه شفاف باهم کوپل شده و عملکرد آن با شبیه سازی عددی در سرعت های متفاوت باد و دماهای متفاوت آب شور آزمایش شده است. نتایج نشان داد که اولاً، سیستم خورشیدی کوپل شده با کارایی مناسب و اشغال فضای کمتر می تواند طرحی نو جهت استفاده در منازل مسکونی یا تجاری باشد. دوماً، سیستم خورشیدی کوپل شده با افزایش سرعت باد، هم آب شیرین بیشتری تولید خواهد کرد و هم توان الکتریکی بیشتری فراهم می کند، چون ماژول خورشیدی با افزایش سرعت باد، خنک تر می شود و بازده بیشتری خواهد داشت. سوماً، با افزایش دمای آب شور میزان تولید آب شیرین به میزان قابل توجهی افزایش می یابد و اثر آن بر کاهش میزان تولید الکتریسیته به علت افزایش دمای سیستم، ناچیز می باشد. از نتایج بدست آمده می توان دریافت که دستگاه آب شیرین کن خورشیدی کوپل شده با ماژول خورشیدی نیمه شفاف، برای مناطق جنوبی کشور با شدت تشعشع و سرعت باد بالا مناسب می باشد. پیشنهاد می شود، تاثیر تعداد و مکان قرارگیری سلول خورشیدی بر میزان تولید آب شیرین و گردابه ها در پژوهش های بعدی مورد بررسی قرار گیرد.
بردار سرعت، ($m s^{-1}$)	V	
مختصات کارتزین، (m)	x, y	
	نماد یونانی	
ضریب پخش گرما، ($m^2 s^{-1}$)	α	
ضریب جذب سلول خورشیدی	α_{cell}	
ضریب جذب طیفی، (m^{-1})	a	
ضریب ثابت استیفان بلتزن، ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$)	σ	
ضریب شکست	n	
ضریب انبساط گونه، ($m^3 kg^{-1}$)	β^*	
ضریب انبساط گرما، (K^{-1})	β	
چگالی، ($kg m^{-3}$)	ρ	
ضریب بازتاب	r	
ضریب عبور	τ	
تابع فاز	ϕ	
زاویه	Ω'	
بازده ماژول خورشیدی	η_{PV}	
بازده ماژول مرجع (۲۰٪)	η_{ref}	

۷- پیوست

جدول ۵- خواص ترموفیزیکی هوای مرطوب تابعی از دمای میانگین [۲۸]

معادله	کمیت
	ظرفیت
$999.2 + 0.1434 \times T_i + 1.101 \times 10^{-4} \times T_i^2 - 6.7581 \times 10^{-8} \times T_i^3$	گرمایی
	ویژه، C_p
$353.44 / (T_i + 273.15)$	چگالی، ρ
	ضریب رسانش
$0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} \times T_i$	حرارتی، k
	لزجت، μ
$1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8} \times T_i$	حرارت
$3.1615 \times 10^6 \times [1 - (7.616 \times 10^{-4} \times T_i)]$ for $T_i > 70^\circ C$	نهان آب، h_{fg}
$2.4935 \times 10^6 \times [1 - (9.4779 \times 10^{-4} \times T_i + 1.3132 \times 10^{-7} \times T_i^2 - 4.7974 \times 10^{-9} \times T_i^3)]$ for $T_i < 70^\circ C$	فشار
	جزئی
$P_g = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273.15}\right)$	اشباع بخار در دمای

۶- فهرست علائم

A	مساحت تابشی، (m^2) 0.452×0.452
A_s	مساحت کف دستگاه خورشیدی، 0.438×0.452
C	غلظت گونه، ($kg m^{-3}$)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، ($J kg^{-1} K^{-1}$)
D	ضریب انتشار، ($m^2 s^{-1}$)
g	شتاب جاذبه، ($m s^{-2}$)
h	آنتالپی مخصوص محسوس، ($J kg^{-1}$)
h_{fg}	آنتالپی نهان تبخیر، ($J kg^{-1}$)
H	آنتالپی مخصوص کل، ($J kg^{-1}$)
I	شدت تشعشع، ($W m^{-2}$)
P	فشار، (Pa)
P_g	فشار جزئی بخار اشباع در دمای شیشه تقطیر، (Pa)
P_w	فشار جزئی بخار اشباع در دمای آب شور، (Pa)
T	دما، (K)
T_i	دمای میانگین آب شور و شیشه تقطیر، ($^\circ C$)
T_g	دمای شیشه، ($^\circ C$)
t	زمان، (s)

- [7] Esfe, Mohammad Hemmat, and Davood Toghraie. (2023) "Numerical investigation of wind velocity effects on evaporation rate of passive single-slope solar stills in Khuzestan province in Iran." *Alex. Eng. J.* 62: 145-156.
- [8] Toosi, Seyed Sina Adibi, Hamid Reza Goshayeshi, and Saeed Zeinali Heris (2021) "Experimental investigation of stepped solar still with phase change material and external condenser." *J. Energy Storage* 40: 102681.
- [9] Saleem, Khalid B., Kaouther Ghachem, Lounes Koufi, and Lioua Kolsi (2021) "Analysis of Double-diffusive natural convection in a solar distiller embedded with PCM and cooled with external water stream." *J. Tai. Inst. Chem. Eng.* 126: 67-79.
- [10] Raihananda, Faiz Akbar, Evan Philander, Alexander Fernando Lauvandy, Tubagus Ahmad Fauzi Soelaiman, Bentang Arief Budiman, Firman Bagja Juangsa, and Poetro Sambegoro (2021) "Low-cost floating solar still for developing countries: Prototyping and heat-mass transfer analysis." *Results in Engineering* 12: 100300.
- [11] Nian, Yong-Le, Yan-Kai Huo, and Wen-Long Cheng (2021) "Study on annual performance of the solar still using shape-stabilized phase change materials with economic analysis." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230: 111263.
- [12] Shoeibi, Shahin, Nader Rahbar, Ahad Abedini Esfahlani, and Hadi Kargarsharifabad (2021) "Improving the thermoelectric solar still performance by using nanofluids-Experimental study, thermodynamic modeling and energy matrices analysis." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47: 101339.
- [13] Serradj, DE Benhadji, T. N. Anderson, and R. J. Nates (2021) "The use of passive baffles to increase the yield of a single slope solar still." *Solar Energy* 226: 297-308.
- [14] Rashidi, Saman, M. Bovand, and J. Abolfazli Esfahani (2016) "Optimization of partitioning inside a single slope solar still for performance improvement." *Desalination* 395: 79-91.
- [15] El-Sebaei, A. A., M. R. I. Ramadan, S. Aboul-Enein, and M. El-Naggar (2015) "Effect of fin configuration parameters on single basin solar still performance." *Desalination* 365: 15-24.
- [16] Rajaseenivasan, T., and K. Srithar (2016) "Performance investigation on solar still with circular and square fins in basin with CO2 mitigation and economic analysis." *Desalination* 380: 66-74.
- [17] Mashaly, Ahmed F., A. A. Alazba, A. M. Al-Awaadh, and Mohamed A. Mattar (2015) "Predictive model for assessing and optimizing solar still performance using artificial neural network under hyper arid environment." *Solar Energy* 118: 41-58.
- [18] El-Maghlany, Wael M (2015) "An approach to optimization of double slope solar still geometry for maximum collected solar energy." *Alex. Engine. J.* 54, no. 4: 823-828.
- [19] Sahota, Lovedeep, and G. N. Tiwari (2017) "Analytical characteristic equation of nanofluid loaded active

	تقطیر
	شیشه
	فشار
	جزئی
	اشباع بخار
	در دمای
	آب شور
$P_w = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273.15}\right)$	ضریب
	انبساط،
$\frac{1}{(T_i + 273.15)}$	β
	ضریب
	انبساط
	گونه،
$\frac{1}{\rho} \left[\frac{M_a}{M_v} - 1 \right] \square 0.513$	β^*
	دمای
	میانگین،
$\left(\frac{T_w + T_g}{2} \right)$	T_i

۸- تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد شماره ۱۴۰۰-۱۲-۱ انجام شد که به این وسیله سپاسگزاری می شود

مراجع

- [1] Dixit, Shivanshu. (2020) "Solar technologies and their implementations: A review." *Materials Today: Proceedings* 28: 2137-2148.
- [2] Rahbar, Nader, and Javad Abolfazli Esfahani (2013) "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis." *Energy* 49: 289-297.
- [3] El-Agouz, S. A., Y. A. F. El-Samadony, and A. E. Kabeel (2015) "Performance evaluation of a continuous flow inclined solar still desalination system." *Energy Conversion and Management* 101: 606-615.
- [4] Rahbar, Nader, Javad Abolfazli Esfahani, and Ehsan Fotouhi-Bafghi (2015) "Estimation of convective heat transfer coefficient and water-productivity in a tubular solar still-CFD simulation and theoretical analysis." *Solar Energy* 113: 313-323.
- [5] Rashidi, Saman, Shima Akar, Masoud Bovand, and Rahmat Ellahi (2018) "Volume of fluid model to simulate the nanofluid flow and entropy generation in a single slope solar still." *Renewable Energy* 115: 400-410.
- [6] Esfe, Mohammad Hemmat, and Davood Toghraie (2022) "Numerical study on the effect of solar radiation intensity on the fresh water productivity of solar still equipped with Thermoelectric Cooling System (TEC) for hot and dry areas of Semnan." *Case Studies in Thermal Engineering* 32: 101848.

- [25] Maadi, Seyed Reza, Meysam Khatibi, Ehsan Ebrahimnia-Bajestan, and David Wood (2019) "Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module—Combining CFD approach and two-band radiation DO model." *Energy conversion and management* 198: 111781.
- [26] Mattei, Michel, Gilles Notton, Christian Cristofari, Marc Muselli, and Philippe Poggi (2006) "Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance." *Renewable energy* 31, no. 4: 553-567
- [27] Sampathkumar, K., T. V. Arjunan, P. Pitchandi, and P. Senthilkumar (2010) "Active solar distillation—A detailed review." *Renewable and sustainable energy reviews* 14, no. 6: 1503-1526.
- [28] Dwivedi, V. K., and G. N. Tiwari (2009) "Comparison of internal heat transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: an experimental validation." *Desalination* 246, no. 1-3: 304-318.
- [29] Shawaqfeh, Ahmad Taleb, and Mohammed Mehdi Farid (1995) "New development in the theory of heat and mass transfer in solar stills." *Solar Energy* 55, no. 6: 527-535.
- [30] Emam, Mohamed, and Mahmoud Ahmed (2018) "Cooling concentrator photovoltaic systems using various configurations of phase-change material heat sinks." *Energy conversion and management* 158: 298-314.
- [31] Tiwari, G. N., A. Minocha, P. B. Sharma, and M. Emran Khan (1997) "Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process." *Energy conversion and management* 38, no. 8: 761-770.
- double slope solar still coupled with helically coiled heat exchanger." *Energy Conversion and Management* 135: 308-326.
- [20] Arora, Swati, Harendra Pal Singh, Lovdeep Sahota, Manoj K. Arora, Ritik Arya, Sparsh Singh, Aayush Jain, and Arvind Singh (2020) "Performance and cost analysis of photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collector integrated solar still using CNT-water based nanofluids." *Desalination* 495 (2020): 114595.
- [21] Isah, Abubakar Sadiq, Husna Bint Takaijudin, Balbir Singh Mahinder Singh, Syed Ihtam UI Haq Gilani, Khamaruzaman Wan Yusof, Abdurrahman Sa'id Abdurrahman, Tijani Oladoyin Abimbola, and Mujana Mohamad Shoeb (2022) "Solar energy desalination distillate yield and cost evolution, and statistical relationship between meteorological variables and distillate yield." *Solar Energy* 246: 256-272.
- [22] Mazraeh, A. E., M. Babayan, M. Yari, Ali M. Sefidan, and Suvash C. Saha (2018) "Theoretical study on the performance of a solar still system integrated with PCM-PV module for sustainable water and power generation." *Desalination* 443: 184-197.
- [23] Saini, Vineet, Lovdeep Sahota, V. K. Jain, and G. N. Tiwari (2019) "Performance and cost analysis of a modified built-in-passive condenser and semitransparent photovoltaic module integrated passive solar distillation system." *J. enrg. Storage* 24: 100809.
- [24] Duan, Juan (2021) "A novel heat sink for cooling concentrator photovoltaic system using PCM-porous system." *Applied Thermal Engineering* 186: 116522.