



Evaluation of Solar Steam Generation under Convective Flow in a Cylindrical Structure with Nature Inspired Water Distribution

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Haghani O.¹,
Heyhat M.M.^{1*},
Mahian O.¹,

How to cite this article

Haghani O, Heyhat M.M, Mahian O. Evaluation of Solar Steam Generation under Convective Flow in a Cylindrical Structure with Nature Inspired Water Distribution. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(09):545-555.

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

² Faculty of Mechanical Engineering, Ningbo University, Ningbo, China.

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

mmheyhat@modares.ac.ir

Article History

Received: September 25, 2024

Accepted: November 20, 2024

ePublished: November 30, 2024

ABSTRACT

The use of interfacial solar evaporation systems can be a suitable method to deal with the problem of fresh water shortage in the world. Interfacial solar evaporation systems can be widely used in the production of fresh water due to the use of solar energy as a without any costs energy and no environmental effects and also free from high pressure operations and no need for moving parts. But in order to use interfacial solar evaporation system for practical application, evaporation rate with high efficiency is required. In this research, the performance of a hollow cylindrical interfacial solar evaporation system with nature inspired water distribution to steam generation has been evaluated by numerical simulation. This system can absorb solar radiation more effectively. In this study, in order to accurately investigate the performance of the interfacial solar evaporation systems, steam generation and system efficiency were evaluated by changing environmental factors. Also, in order to investigate the performance of the interfacial solar evaporation systems under different angles of solar radiation in real world conditions, the rate of steam generation in two days of summer solstice and winter solstice in Tehran city has been evaluated. The results of this research show that the cylindrical interfacial solar evaporation system can have a steam generation rate of 3.09 kg/m².h and 9.09 kg/m².h in winter solstice and summer solstice respectively in Tehran city with wind flow.

Keywords Interfacial Solar Evaporation, Nature Inspired, Environmental Energy, Simulation

CITATION LINKS

1- Experimental Study of the Performance of the Solar Still... 2- Domestic water quantity, service level and health... 3- Numerical Simulation of Single Slope Solar Still... 4- Membrane distillation assisted by heat pump for improved... 5- Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination... 6- Experimental Investigation and Exergy Analysis of Solar Parabolic Dish... 7- Experimental Study of Solar Distillation using PCM... 8- Solar water evaporation by black photothermal... 9- Improving the performance of graphite-based solar water... 10- Solar steam generation based on the photothermal... 11- Water desalination using solar steam generation... 12- Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic... 13- Multilayer polypyrrole nanosheets with self-organized surface... 14- Synthesis of hierarchical graphdiyne-based architecture... 15- A metal nanoparticle assembly with broadband absorption... 16- Steam generation under one sun enabled... 17- Challenges and opportunities for solar evaporation... 18- Highly efficient solar vapour generation... 19- All-cold evaporation under one sun... 20- Reversing heat conduction loss: extracting energy from... 21- Over 10 kg.m⁻².h⁻¹ evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous... 22- Ultrahigh solar vapor evaporation rate of... 23- Evaporation rate far beyond the input... 24- Distinct stage-wise environmental energy harvesting...

ارزیابی تولید بخار خورشیدی تحت جریان همرفتی در ساختار استوانه‌ای با توزیع آب الهام گرفته شده از طبیعت

امید حقانی^۱، محمد مهدی هیهات^{۲*}، امید ماهیان^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه نینگبو، نینگبو، چین.

چکیده

استفاده از سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی می‌تواند روشی مناسب برای مقابله با مشکل کمبود آب شیرین در جهان باشد. سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی به دلیل استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی فاقد هزینه و بدون اثرات زیست محیطی و همچنین به دلیل عاری بودن از عملیات فشار بالا و عدم نیاز به قطعات متحرک می‌توانند به طور گسترده در تولید آب شیرین استفاده شوند. اما برای استفاده از سیستم تبخیر خورشیدی سطحی برای کاربرد عملی، نرخ تبخیر با راندمان بالا مورد نیاز است. لذا در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی عملکرد یک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای شکل توخالی با مکانیزم انتقال آب الهام گرفته شده از طبیعت به منظور تولید بخار مورد ارزیابی قرار گرفته است. این سیستم می‌تواند به طور موثرتری تابش خورشید را جذب نماید. در این پژوهش به منظور بررسی دقیق عملکرد سیستم تبخیر خورشیدی سطحی معرفی شده نرخ تولید بخار و بازده سیستم با تغییر عوامل محیطی ارزیابی شده است. همچنین به منظور بررسی عملکرد این سیستم تحت زوایای مختلف تابش خورشیدی در شرایط واقعی، میزان تولید بخار در دو روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد سامانه تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای می‌تواند نرخ تولید بخار ۳/۰۹ کیلوگرم بر مترمربع-ساعت و ۹/۰۹ کیلوگرم بر مترمربع-ساعت را به ترتیب در روزهای انقلاب زمستانی و انقلاب تابستانی در شهر تهران همراه با جریان باد داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: تبخیر خورشیدی سطحی، الهام از طبیعت، انرژی محیطی، شبیه‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

* نویسنده مسئول: mmheyhat@modares.ac.ir

۱- مقدمه

تأمین آب بعد از هوا از نیازهای اساسی انسان و موجودات زنده به شمار می‌آید [1]. سازمان بهداشت جهانی حداقل آب مورد نیاز هر فرد در روز برای نوشیدن، پخت و پز و بهداشت را ۱۰۰ لیتر تخمین زده است [2]. اگر بر اساس این واقعیت که ۷۱ درصد کره زمین را آب پوشانده است، آب شیرین فراوان فرض شود این فرض نادرست خواهد بود زیرا تنها ۰/۱ درصد آب‌های شیرین موجود در دسترس انسان‌ها است [3].

فناوری‌های سنتی تولید آب شیرین مانند تقطیر حرارتی و فیلتراسیون غشایی به دلیل استفاده زیاد از الکتریسیته تولید شده از سوخت‌های فسیلی سازگار با محیط زیست نیستند [4]. بنابراین

در حال حاضر فناوری‌های تولید آب شیرین با استفاده از منابع انرژی پایدار و سبز کاربرد بیشتری دارند [5]. استفاده از انرژی خورشیدی در تولید آب شیرین می‌تواند یک رویکرد امیدوارکننده و سلاخی اساسی برای رویارویی با مشکلات انرژی، ارائه راه‌حل‌های کارآمد و اقتصادی باشد زیرا مقدار انرژی که از خورشید در یک ساعت به زمین می‌رسد می‌تواند انرژی مورد نیاز انسان را برای یک سال پوشش دهد [6]. از طرفی کشور ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب و پتانسیل بالای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی می‌تواند شرایط مناسبی برای استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی داشته باشد [7].

سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی شامل جاذب خورشیدی، ساختار تبخیر شناور و عایق حرارتی است. در تحقیقات اولیه مربوط به سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی به منظور بهبود نرخ تبخیر عملکرد مواد مختلف فتوترمال (photothermal) برای استفاده مؤثر از نور خورشید و تولید گرما مورد بررسی قرار گرفت [8]. نیمه‌هادی‌ها، فلزات پلاسمونیک [9] و مواد مبتنی بر کربن سه نوع اصلی جاذب خورشیدی هستند که به عنوان مواد فتوترمال در سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی استفاده می‌شوند [10]. مواد مبتنی بر کربن مانند گرافیت [11] و کربن سیاه [12] به دلیل هزینه کم و دسترسی آسان به اولین نامزدها در سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی تبدیل شده‌اند.

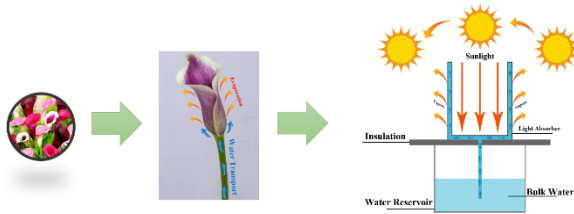
با توجه به کشف مواد مختلف فتوترمال با جذب عالی نور خورشید در نخستین گام سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی دوبعدی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفتند. با این حال اگر انرژی در سیستم‌های تبخیر خورشیدی دو بعدی مدیریت نشود بخش قابل توجهی از انرژی حرارتی تولیدی اتلاف شده و برای تبخیر آب استفاده نمی‌شود. برای این منظور محققان راهکارهایی برای حداکثر استفاده از انرژی خورشیدی برای تبخیر آب ارائه کرده‌اند. اگر سطح مواد فتوترمال صاف باشد بخشی از نور خورشید منعکس می‌شود. بنابراین با اصلاح مورفولوژی سطح فتوترمال [13] و ایجاد بازتاب‌های متعدد نور خورشید [14] می‌توان حداکثر انرژی خورشیدی را به دست آورد. کاهش تلفات تشعشعی را می‌توان با استفاده از مواد فتوترمال با بازتاب کمتر [15] و با کاهش دمای سطح تبخیر به دست آورد. تلفات همرفتی را نیز می‌توان با پوشاندن بخشی از سطح مشترک بین سطح تبخیر و هوا کاهش داد [16].

با این حال در سیستم‌های تبخیر سطحی دو بعدی دمای سطح تبخیر بالاتر از دمای هوای محیط است. بنابراین انرژی گرمایی به محیط از دست خواهد رفت [17]. با فرض تبدیل ۱۰۰٪ انرژی خورشیدی به گرما، انتقال انرژی از سیستم تبخیر خورشیدی سطحی به محیط باعث می‌شود که میزان تولید بخار کمتر از حد تئوری (۱/۴۷ کیلوگرم بر متر مربع-ساعت) انرژی خورشیدی ورودی به سیستم (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) باشد. به منظور شکستن حد تئوری انرژی خورشیدی در تولید بخار علاوه بر کاهش آنتالپی

۲- مدل محاسباتی

۲-۱- مدل فیزیکی و شرح مسئله

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد یک ساختار استوانه‌ای توخالی با الهام از مکانیزم انتقال آب در طبیعت در تبخیر خورشیدی سطحی است. ساختار و مسیر انتقال آب در این سیستم تبخیر خورشیدی سطحی از مکانیزم انتقال آب در گل‌ها الهام گرفته شده است. شماتیک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی ایجاد شده در نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس (COMSOL Multiphysics) ۶/۲ در شکل ۱ نشان داده شده است. در این سیستم مواد فتوترمال دیواره بیرونی و داخلی استوانه را پوشش داده و تولید بخار از سطح بیرونی استوانه انجام خواهد شد.



شکل ۱) شماتیک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی

۲-۲- معادلات کلی

مدل‌سازی عددی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی توسط مازول‌های جریان آرام، انتقال حرارت، انتقال رطوبت و تابش سطح به سطح ارزیابی می‌شود. سرعت جریان همرفتی با معادلات ۱، ۲ و ۳ محاسبه می‌شود [23]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (2)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3)$$

جایی که ρ چگالی جریان هوای همرفتی است، t زمان، u بردار سرعت، p نشان‌دهنده فشار، I ضریب رابطه سازنده، K تانسور تنش ویسکوز، F نشان‌دهنده بردار نیروی حجمی و μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است. فرآیند انتقال حرارت با معادلات ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ محاسبه می‌شود [23]:

$$\rho C_{p,a} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_{p,a} u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd} + Q_H \quad (4)$$

$$q = -k \nabla T \quad (5)$$

$$Q_p = \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) \quad (6)$$

$$Q_{vd} = \tau \cdot \nabla u \quad (7)$$

$$Q_H = -(C_{p,v} - C_{p,a}) g_w \cdot \nabla T \quad (8)$$

در جایی که $C_{p,a}$ ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای هوا، T نشان‌دهنده دمای مطلق، q شار حرارتی توسط رسانش، k نشان‌دهنده رسانایی حرارتی، Q منبع گرما، Q_p کاری است که توسط تغییرات فشار انجام می‌شود و نتیجه گرمایش تحت فشار آدیاباتیک و همچنین برخی اثرات ترموآکوستیک است (به طور

تبخیر [18] تحقیقات سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی را از ساختارهای دو بعدی به سه بعدی توسعه داده است.

در سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی سه بعدی با ایجاد سطوح تبخیر بدون تابش خورشیدی می‌توان انرژی را از هوای اطراف [19] و آب [20] به دست آورد. تبخیر آب در سطوح بدون تابش خورشیدی باعث می‌شود که دمای سطح تبخیر کمتر از دمای محیط و آب باشد. بنابراین انرژی از هوای اطراف و آب به عنوان مکمل انرژی خورشیدی به سیستم تبخیر منتقل می‌شود.

در سیستم‌های سه بعدی تبخیر خورشیدی سطحی علاوه بر دریافت انرژی از محیط استفاده از جریان همرفتی هوا و انرژی باد [21] نیز می‌تواند در افزایش سرعت تبخیر خورشیدی موثر باشد. انتشار بخار رطوبت سطح تبخیر و فشار بخار را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه سرعت تبخیر افزایش می‌یابد. استفاده از وزش باد و ایجاد جریان همرفتی هوا یک رویکرد موثر در انتشار بخار است. بنابراین استفاده از سیستم‌های تبخیر خورشیدی سطحی که می‌توانند به طور همزمان از انرژی خورشیدی و جریان همرفتی استفاده کنند بسیار مناسب بوده و سرعت تبخیر را افزایش می‌دهند [22].

مطالعات قبلی نشان می‌دهند که افزایش میزان نرخ تبخیر و پارامترهای موثر بر آن در تحقیقات متعددی مورد بررسی قرار گرفته و محققین به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از سیستم تبخیر خورشیدی سطحی با ساختار سه بعدی همراه با جریان هوای همرفتی می‌تواند شرایط مناسبی را در عملکرد یک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی ایجاد کند. بنابراین در این تحقیق عملکرد یک سازه استوانه‌ای توخالی با الهام از مکانیزم انتقال آب در طبیعت در تبخیر خورشیدی سطحی با شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود. در این پژوهش به منظور افزایش راندمان تبخیر از جریان هوای همرفتی با سرعت‌های مختلف استفاده شده و تأثیر شدت تابش نور خورشید و رطوبت و دما هوا بر میزان تبخیر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عملکرد این سیستم در شهر تهران با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی در روز اول تیر (انقلاب تابستانی) و اول دی (انقلاب زمستانی) با زوایای مختلف تابش خورشید مورد ارزیابی قرار گرفته و نقش دیواره‌های داخلی و خارجی این ساختار در جذب نور خورشید در این دو روز بررسی شده است. سیستم تبخیر خورشیدی سه بعدی معرفی شده به دلیل ساختار متقارن محوری خود می‌تواند از انرژی باد در هر جهتی استفاده کند. در این سیستم تبخیر به دلیل استفاده از ساختار توخالی، با به دام انداختن تابش خورشید در داخل استوانه توخالی، حداکثر استفاده از تابش خورشید فراهم می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از ساختار تبخیر سطحی معرفی شده می‌تواند عملکرد مناسبی در میزان تبخیر ارائه دهد.

$$u \geq 0 : q = 0 \quad (۲۱)$$

برای دیوار ۷ سرمایش تبخیری که با سرعت تبخیر آب مرتبط بود اعمال شد [23]:

$$q_{evap} = -L_v g_{evap} \quad (۲۲)$$

در مدل سازی انتقال رطوبت در هوا برای دیوارهای ۱، ۲، ۳ و ۴ شرایط مرزی عایق اعمال شده است [23]:

$$g_w = 0 \quad (۲۳)$$

برای دیوارهای ۵ و ۶ به ترتیب از شرایط مرزی ورودی و شرایط مرزی خروجی استفاده شد [23]:

$$g_w = M_v (c_v - c_{ustr}) u \quad (۲۴)$$

$$g_w = 0 \quad (۲۵)$$

برای دیواره ۷ شرایط مرزی سطح مرطوب در نظر گرفته می شود [23]:

$$g_{evap} = M_v K (c_{sat} - c_v) \quad (۲۶)$$

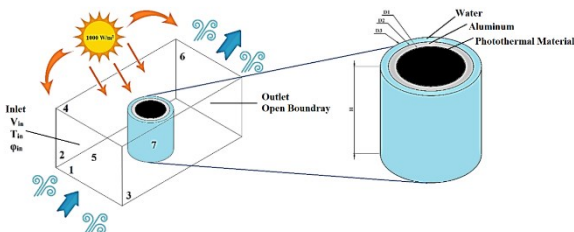
برای دیوارهای داخلی و خارجی استوانه از شرایط مرزی سطح پراکنده و منبع تشعشع خارجی استفاده شده است [23].

$$\varepsilon + \rho_d = 1 \quad (۲۷)$$

$$G_{ext} = q_s \quad (۲۸)$$

$$q_{r,net} = \varepsilon (G - e_b(T)) \quad (۲۹)$$

$$q_s = F_{ext}(i_s) q_{0,s} \quad (۳۰)$$



شکل ۲) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

جزئیات هندسی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی مورد مطالعه در جدول ۱ فهرست شده است. ضخامت لایه آب و آلومینیوم مطابق پژوهش ژانگ و همکاران [24] در نظر گرفته شده است. در شبیه سازی انجام شده خواص آب و هوا وابسته به دما و خواص لایه آلومینیوم مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱) جزئیات هندسی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی.

پارامتر	مقدار	واحد
D1	۴۹/۶	میلی متر
D2	۴۹/۸	میلی متر
D3	۵۰	میلی متر
H	۵۰	میلی متر

جدول ۲) خواص لایه آلومینیوم بکار رفته در شبیه سازی.

ماده	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (J/kg.K)	رسانایی حرارتی (W/m.K)	چگالی (kg/m ³)
آلومینیوم	۹۰۰	۲۳۸	۲۷۰۰

کلی برای جریان های با ماخ پایین کوچک است)، Q_{vd} نشان دهنده اتلاف ویسکوز در سیال است، Q_H شار انتشار آنتالپی حرارتی به دلیل نرخ تغییر هوا و بخار در هوای مرطوب، $C_{p,v}$ ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت برای بخار و g_w شار بخار توسط انتشار است. بخار تولید شده توسط سیستم تبخیر خورشیدی سطحی به جریان هوای همرفتی منتقل می شود. بنابراین غلظت بخار با معادلات ۹، ۱۰ و ۱۱ محاسبه می شود [23]:

$$M_v \frac{\partial C_v}{\partial t} + M_v u \cdot \nabla C_v + \nabla \cdot g_w = G \quad (۹)$$

$$g_w = -M_v D \nabla C_v \quad (۱۰)$$

$$C_v = \phi_w C_{sat} \quad (۱۱)$$

که در آن M_v نشان دهنده جرم مولی بخار آب، C_v غلظت بخار، G منبع رطوبت، D نشان دهنده ضریب انتشار بخار در هوا و ϕ_w نشان دهنده رطوبت نسبی و C_{sat} غلظت بخار اشباع است. معادلات تابش سطح به سطح در قالب معادلات ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ حل می شود [23]:

$$J = \varepsilon e_b(T) + \rho_d G \quad (۱۲)$$

$$G = G_m + G_{amb} + G_{ext} \quad (۱۳)$$

$$G_{amb} = F_{amb} \varepsilon_{amb} e_b(T_{amb}) \quad (۱۴)$$

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (۱۵)$$

در جایی که J پرتوزایی، ε نشان دهنده گسیل سطح ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), e_b نشان دهنده شدت تابش جسم سیاه، ρ_d بازتاب پراکنده، G شار گرمای تابشی ورودی، G_m نشان دهنده تابش متقابل است که از مرزهای دیگر در مدل می آید. G_{amb} تابش از محیط، G_{ext} تابش از منابع خارجی، ε_{amb} ضریب انتشار محیطی، F_{amb} ضریب دید محیطی است که مقدار آن برابر با کسری از میدان دید است که توسط مرزهای دیگر پوشانده نشده است. T_{amb} دمای محیط، n ضریب شکست و σ ثابت استفان بولتزمن است.

۲-۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی و حوزه محاسباتی در شکل ۲ نشان داده شده است. در مدل سازی جریان سیال در حوزه محاسباتی برای دیوارهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۷ از شرایط مرزی دیوار استفاده شده است [23]:

$$u = 0 \quad (۱۶)$$

برای دیوارهای ۵ و ۶ به ترتیب از شرایط مرزی سرعت ورودی و شرایط مرزی محیط باز استفاده شد [23]:

$$u = u_{in} \quad (۱۷)$$

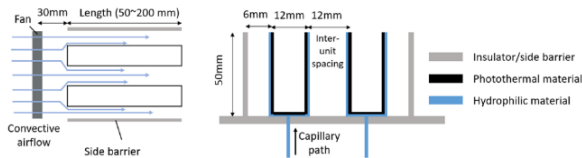
$$[-pI + K] = 0 \quad (۱۸)$$

در مدل سازی انتقال حرارت در هوای مرطوب برای دیوارهای ۱، ۲، ۳ و ۴ از شرایط مرزی عایق حرارتی استفاده شده است [23]:

$$q = 0 \quad (۱۹)$$

برای دیوارهای ۵ و ۶ به ترتیب از شرایط مرزی ورودی و شرایط مرزی محیط باز استفاده شد [23]:

$$q = \rho \Delta H u \quad (۲۰)$$



شکل ۴) سیستم تبخیر سطحی بررسی شده توسط ژانگ و همکاران [24]

جدول ۴) مقایسه روش عددی با داده‌های تجربی ژانگ و همکاران.

طول واحد تبخیر (mm)	نرخ تبخیر (داده‌های تجربی ژانگ و همکاران) (kg/m ² .h)	نرخ تبخیر (روش عددی کار حاضر) (kg/m ² .h)
۵۰	۴/۱۶	۴/۳۸
۷۵	۳/۸۷	۴/۱۷
۱۰۰	۳/۴۲	۳/۷۵
۱۲۵	۳/۱۹	۳/۵۹
۱۵۰	۲/۹۴	۳/۳۹
۱۷۵	۲/۷۱	۳/۲۵
۲۰۰	۲/۴۷	۲/۹۵

۳- نتایج

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته و انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی ژانگ و همکاران در این بخش عملکرد یک سامانه تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای توخالی در تولید بخار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مطابق جدول ۵ به منظور بررسی دقیق عملکرد این سامانه تأثیر عوامل محیطی بر نرخ تولید بخار (\dot{m}) و بازده سیستم (η) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین شبیه‌سازی در دو روز انقلاب تابستانی (۱ تیر ۱۴۰۲) و انقلاب زمستانی (۱ دی ۱۴۰۲) با توجه به حرکت خورشید و تغییر زاویه تابش نور خورشید از ساعت ۸ صبح تا ۳ بعد از ظهر در شهر تهران انجام شده و نقش دیواره‌های داخلی و خارجی این ساختار استوانه‌ای در جذب نور خورشید و تولید بخار بررسی شده است. شایان ذکر است در هر مرحله به منظور بررسی تأثیر هرکدام از پارامترهای محیطی در نرخ تولید بخار و راندمان سیستم، مقادیر پارامتر مربوطه مطابق جدول ۵ تغییر کرده و برای سایر پارامترها از مقادیر مبنا در شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین در شبیه‌سازی‌هایی که به منظور بررسی پارامترهای محیطی در نرخ تولید بخار و راندمان سیستم انجام شده است تابش نور خورشید صرفاً به صورت عمود بر سامانه تبخیر خورشیدی سطحی در نظر گرفته شده است.

جدول ۵) پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی و مقادیر آنها.

سرعت باد (u) (m/s)	دما هوا (T) (°C)	رطوبت هوا (ϕ) (%)	شدت تابش نور خورشید (G) (W/m ²)
*	۱۰	۳۰	۲۰۰
۰/۵	۲۰	۴۰	۴۰۰
۱	۳۰*	۵۰*	۶۰۰
۱/۵	۴۰	۶۰	۸۰۰
۲	۵۰	۷۰	۱۰۰۰*

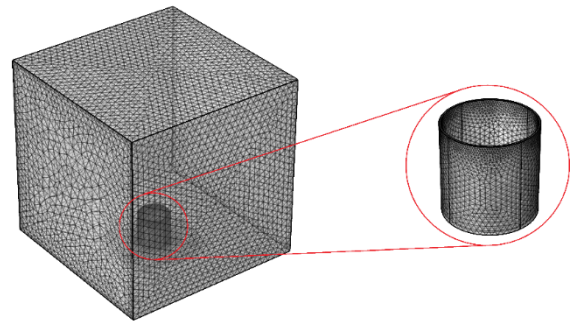
* مقادیر مبنا در شبیه‌سازی

۲-۴- مدل عددی

با توجه به اینکه تعداد المان‌های شبکه ایجاد شده می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد، یک مطالعه پارامتریک بر روی تعداد المان‌های شبکه انجام شد. شبکه چهاروجهی متناسب با فیزیک مسئله به طور خودکار توسط نرم افزار ایجاد شد. تعداد المان‌های شبکه طبق جدول ۳ در ۴ مرحله افزایش یافت و میزان تبخیر خورشیدی سطحی بین شبکه‌های متوالی مقایسه شد. در این شبیه‌سازی قطر خارجی و ارتفاع استوانه ۵۰ میلی‌متر، دمای هوا ۳۰ درجه سلسیوس، رطوبت هوا ۵۰ درصد، شدت تابش نور خورشید ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و به صورت عمود، ضریب جذب نور خورشید ۰/۶ و شرایط بدون وزش باد در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است میزان تبخیر خورشیدی سطحی بین شبکه شماره ۳ و شماره ۴ دارای ۱/۵ درصد اختلاف است. بنابراین شبکه شماره ۳ به عنوان شبکه مناسب انتخاب شد. شکل ۳ شبکه بهینه انتخاب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳) بررسی استقلال از شبکه.

شماره شبکه	تعداد المان	نرخ تبخیر (kg/m ² .h)	درصد اختلاف نرخ تبخیر
۱	۳۳۷۸۲	۱/۵۸۶	۵/۲
۲	۸۰۴۷۷	۱/۵۰۳	۲/۸
۳	۲۹۷۳۶۵	۱/۴۸۴	۱/۵
۴	۱۱۷۰۶۸۷	۱/۴۶۱	-



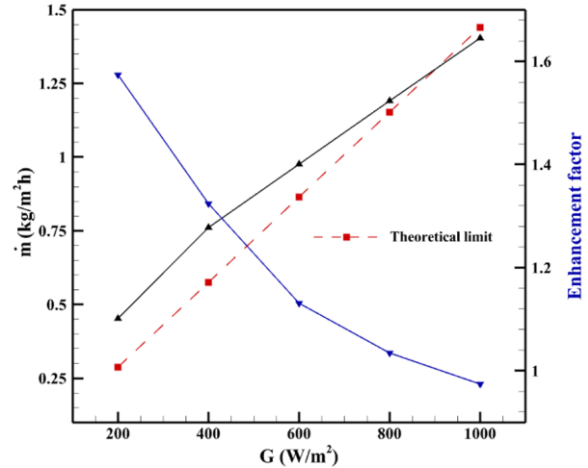
شکل ۳) شبکه بهینه انتخاب شده جهت شبیه‌سازی.

۲-۵- اعتبارسنجی مدل

در این پژوهش روش عددی با نتایج تجربی ژانگ و همکاران [24] در یک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی مورد بررسی و تایید قرار گرفت. ژانگ و همکاران مطابق شکل ۴ عملکرد یک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی را در داخل میدان جریان هوای همرفتی بررسی کردند. در این پژوهش نور خورشید شبیه‌سازی شده واحدهای تبخیری را روشن می‌کرد و مواد فتوترمال روی دیواره داخلی شار خورشیدی را دریافت می‌کردند. طول واحدهای تبخیرکننده از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر متغیر بود. مقادیر عددی نرخ تبخیر در جدول ۴ مطابقت خوبی با داده‌های تجربی پژوهش ژانگ و همکاران دارد و حداکثر اختلاف ۱۹/۳٪ را نشان می‌دهد.

۳-۱- تأثیر شدت تابش نور خورشید بر میزان تبخیر و ضریب افزایش نرخ تبخیر

شکل ۵ میزان تولید بخار در شدت‌های مختلف تابش نور خورشید را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ با افزایش شدت تابش نور خورشید میزان تولید بخار افزایش یافته است.



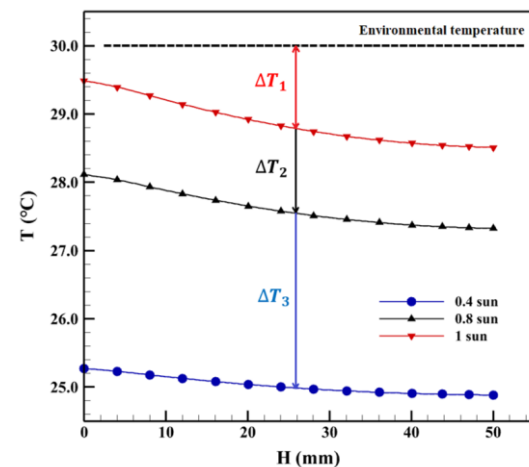
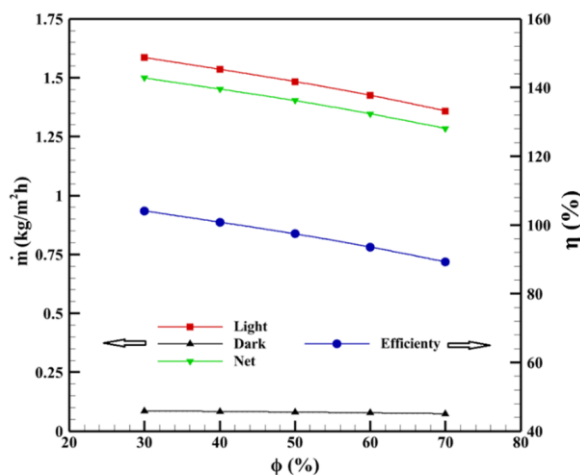
نور خورشید اختلاف دمای سطح تبخیر و هوای محیط افزایش می‌یابد. افزایش اختلاف دما بین سطح تبخیر و دمای محیط منجر به افزایش انتقال انرژی از هوای محیط به سیستم تبخیر می‌شود. به همین دلیل استفاده از نور خورشید با شدت تابش نور کمتر توانسته است ضریب افزایش نرخ تبخیر بالاتری ایجاد کند.

۳-۲- تأثیر رطوبت نسبی هوا بر نرخ تولید بخار و راندمان سیستم

شکل ۶ نرخ تبخیر و بازده سیستم را در رطوبت هوا مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت نسبی هوا میزان تولید بخار در شرایط استفاده از نور خورشید و عدم استفاده از نور خورشید افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش رطوبت نسبی هوا راندمان سیستم و میزان تولید بخار خالص (که در معادلات ۳۲ و ۳۳ تعریف شده‌اند) افزایش می‌یابد.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{net} h_{lv}}{I} \quad (32)$$

$$\dot{m}_{net} = \dot{m}_{light} - \dot{m}_{dark} \quad (33)$$

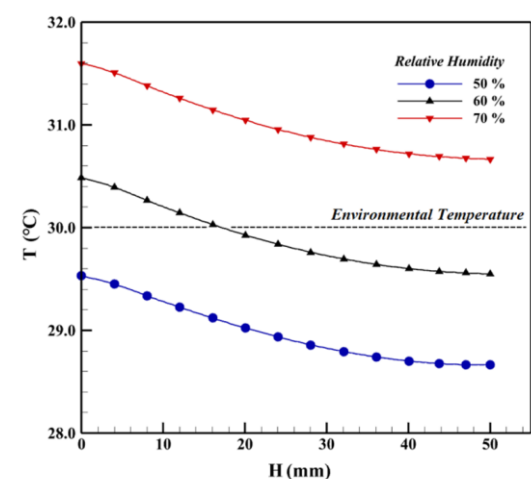


شکل ۵) نرخ تبخیر، ضریب افزایش نرخ تبخیر و توزیع دما در دیواره بیرونی سیستم تبخیر تحت شدت‌های مختلف تابش نور خورشید.

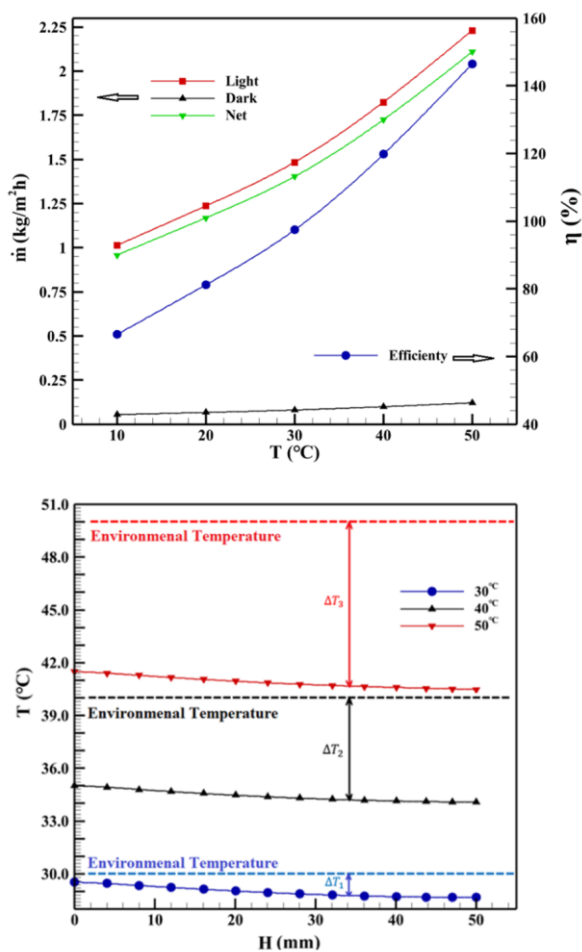
اما به منظور بررسی عملکرد سیستم تبخیر خورشیدی سطحی به صورت دقیق‌تر از مفهوم ضریب افزایش نرخ تبخیر مطابق با رابطه ۳۱ استفاده شده است:

$$\text{ضریب افزایش نرخ تبخیر} = \frac{\text{نرخ تبخیر واقعی}}{\text{نرخ تبخیر تئوری}} \quad (31)$$

مطابق شکل ۵ ضریب افزایش نرخ تبخیر با افزایش شدت نور خورشید کاهش می‌یابد. در شدت تابش نور خورشید ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ وات بر متر مربع ضریب افزایش نرخ تبخیر بیش از ۱ و در شدت نور خورشید ۱۰۰۰ وات بر متر مربع نزدیک به ۱ محاسبه شده است. شکل ۵ همچنین توزیع دمای دیواره بیرونی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی در شدت تابش خورشیدی ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات را نشان می‌دهد. در این شکل ΔT اختلاف دمای بین سطح تبخیر و دمای محیط را بیان می‌کند. مطابق شکل ۵ با کاهش شدت تابش



شکل ۶) نرخ تبخیر، راندمان و توزیع دما در دیواره بیرونی سیستم تبخیر با رطوبت نسبی هوا مختلف.



شکل ۷) نرخ تبخیر، راندمان و توزیع دما در دیواره بیرونی سیستم تبخیر با دما هوای مختلف.

تبخیر با جریان باد حرکت می‌کنند و حجم مولکول‌های بخار آب در سطح تبخیر کاهش می‌یابد. تئوری جنبشی کلاسیک گازها [24] توضیح می‌دهد که سرعت تبخیر در دو مرحله متوالی تغییر فاز آب و انتشار بخار آن تعیین می‌شود. انتشار بخار، رطوبت سطح تبخیر و فشار بخار را کاهش می‌دهد و سرعت تبخیر افزایش می‌یابد. در نتیجه، عوامل ذکر شده منجر به افزایش سرعت تولید بخار و راندمان سیستم تبخیر می‌شود.

شکل ۹ توزیع سرعت و رطوبت نسبی را با سرعت وزش باد ۱ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. جریان باد توانسته است رطوبت نسبی جلوی استوانه تبخیر سطحی را کاهش دهد. اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از جریان باد منجر به ایجاد جریان چرخشی در داخل استوانه توخالی شده است. جریان چرخشی داخل استوانه باعث افزایش رطوبت نسبی فضای داخلی آن شده است. بنابراین افزودن سطوح داخلی استوانه به سطح تبخیر نمی‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش نرخ تولید بخار داشته باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که جریان برگشتی در پشت استوانه نیز منجر به افزایش رطوبت هوا در این ناحیه شده است. افزایش رطوبت هوای پشت استوانه توخالی باعث شده است که میزان تولید بخار توسط

زمانی که رطوبت نسبی هوا زیاد باشد جریان هوا تمایلی به جذب بخار آب ندارد. در این شرایط مولکول‌های آب به راحتی از سطح مایع جدا نشده و به درون هوای محیط وارد نمی‌شود. در نتیجه میزان تولید بخار و راندمان سیستم کاهش می‌یابد.

شکل ۶ همچنین توزیع دمای سطح تبخیر در شرایط استفاده از هوا با رطوبت نسبی متفاوت را مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دمای سطح تبخیر با افزایش رطوبت هوای محیط بیشتر شده است. با افزایش رطوبت هوا سرعت تولید بخار کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان سرمایه‌گذاری تبخیری نیز کمتر می‌شود. در شرایط استفاده از هوا با رطوبت نسبی ۷۰ درصد کاهش میزان تبخیر منجر به بیشتر شدن دمای سطح تبخیر از دمای محیط باعث می‌شود بخشی از انرژی سیستم تبخیر خورشیدی به محیط منتقل شود و راندمان سیستم کاهش یابد.

۳-۳-۳- تأثیر دمای هوا بر نرخ تولید بخار و راندمان سیستم

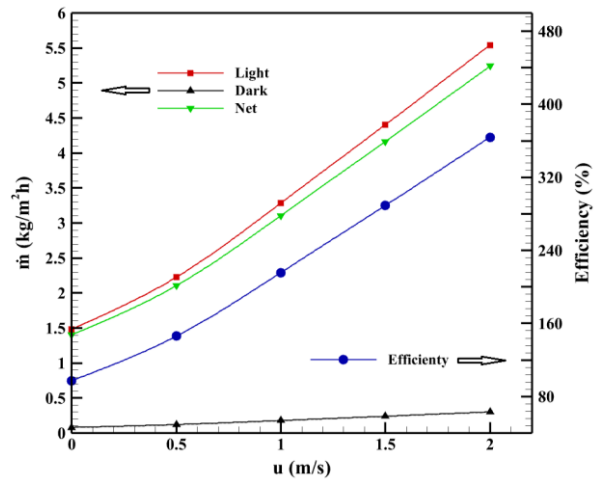
شکل ۷ نرخ تبخیر و راندمان سیستم را در دمای هوا مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷ با افزایش دمای هوا میزان تبخیر در شرایط استفاده از نور خورشید و عدم استفاده از نور خورشید بهبود یافته است. همچنین میزان خالص تولید بخار و راندمان سیستم با افزایش دمای هوا بیشتر شده است. هنگامی که دما هوا افزایش می‌یابد مقدار انرژی مورد نیاز برای تبخیر کاهش می‌یابد. با افزایش دمای هوا مولکول‌های آب به انرژی جنبشی بالاتری دست یافته و انرژی کافی برای رسیدن به حالت بخار را دریافت می‌کنند در نتیجه سرعت تولید بخار افزایش می‌یابد [24].

شکل ۷ همچنین توزیع دما بر روی دیواره بیرونی استوانه تبخیر سطحی خورشیدی را نشان می‌دهد. با افزایش دمای هوا دمای سطح تبخیر نیز افزایش یافته است. افزایش دمای سطح تبخیر باعث افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های آب و بهبود سرعت تبخیر می‌شود. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای محیط اختلاف دمای سطح تبخیر و دمای محیط بیشتر شده و باعث می‌شود انرژی بیشتری از محیط به سیستم تبخیر خورشیدی سطحی منتقل شود. لذا استفاده از دمای بالاتر هوا توانسته است بازده بهتری داشته باشد.

۳-۳-۴- تأثیر سرعت وزش باد بر نرخ تبخیر و راندمان سیستم

در این بخش تأثیر سرعت وزش باد بر میزان تبخیر و بازده سیستم بررسی شده است مطابق شکل ۸ با افزایش سرعت وزش باد میزان تولید بخار در شرایط استفاده از نور خورشید و عدم استفاده از نور خورشید افزایش یافته است. نرخ خالص تولید بخار و راندمان سیستم نیز با افزایش سرعت وزش باد بیشتر شده است. با افزایش سرعت وزش باد مولکول‌های بخار آب جمع شده در نزدیکی سطح

شمالی در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرد. انقلاب زمستانی آغاز فصل زمستان است و در این روز ناحیه کوچکتری از نیمکره شمالی در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرد. زاویه تابش نور خورشید در این دو روز با توجه به موقعیت جغرافیایی شهر تهران (۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی / ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی) از ساعت ۸ صبح تا ۳ بعد از ظهر به طور دقیق شبیه‌سازی شده است. همچنین مطابق جدول ۶ اطلاعات دما هوا، رطوبت نسبی هوا و سرعت وزش باد در این دو روز از سایت سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است. در شبیه‌سازی از میانگین مقادیر دما و رطوبت هوا و سرعت وزش باد در این دو روز استفاده شده است. شدت تابش نور خورشید نیز با در نظر گرفتن آسمان صاف ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

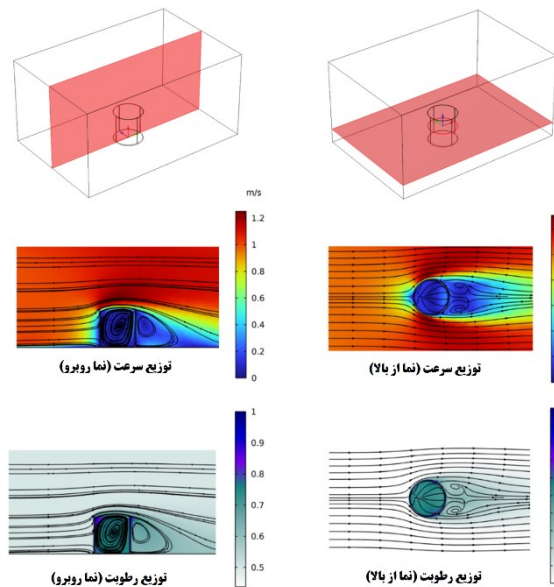


شکل ۸) تأثیر سرعت وزش باد بر نرخ تبخیر و راندمان سیستم.

جدول ۶) تغییرات زمانی رطوبت نسبی، دما هوا و سرعت وزش باد.

زمان	۱ تیر ۱۴۰۲ (انقلاب تابستانی)		۱ دی ۱۴۰۲ (انقلاب زمستانی)	
	دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت وزش باد (m/s)	سرعت وزش باد (m/s)
۸:۰۰	۳۰/۹	۱۸	۳	۴۲
۹:۰۰	۳۲/۱	۱۷	۲	۴۲
۱۰:۰۰	۳۳/۱	۱۴	۲	۴۲
۱۱:۰۰	۳۳/۷	۱۳	۳	۴۱
۱۲:۰۰	۳۳/۴	۱۱	۳	۴۲
۱۳:۰۰	۳۳/۶	۱۰	۲	۴۵
۱۴:۰۰	۳۳/۷	۸	۳	۴۷
۱۵:۰۰	۳۲/۵	۱۳	۰	۴۹
میانگین	۳۲/۸	۱۳	۲/۲	۴۳/۸

شکل ۱۰ نرخ تولید بخار از ساعت ۸ صبح تا ۳ بعد از ظهر در دو روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی در شهر تهران را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص شده است نرخ تولید بخار در این دو روز در شرایطی که هر کدام از دیواره‌های داخلی یا خارجی سامانه تبخیر سطحی به تنهایی به عنوان جاذب نور خورشید عمل می‌کند و همچنین در شرایطی که هر دو دیواره داخلی و خارجی به صورت همزمان به عنوان جاذب نور خورشید عمل کرده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در هر دو روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی از سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای توخالی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر با ضریب جذب نور خورشید ۰/۶ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در روز انقلاب تابستانی نسبت به روز انقلاب زمستانی افزایش دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی منجر به افزایش نرخ تولید بخار شده است. در انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی در شرایطی که فقط دیواره داخلی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای توخالی به عنوان جاذب نور خورشید عمل کرده است در ساعت ۱۲ بیشترین میزان نرخ تولید بخار رخ داده است. در این ساعت با توجه به زاویه تابش نور خورشید می‌تواند بیشترین استفاده از تابش انرژی خورشیدی



شکل ۹) توزیع سرعت و رطوبت نسبی در سیستم تبخیر خورشیدی سطحی با سرعت باد ۱ متر بر ثانیه.

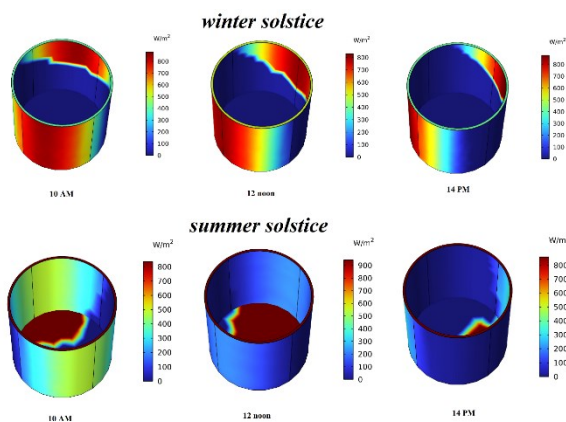
دیواره پشتی استوانه توخالی کاهش یابد. یکی از مهمترین مزایای سیستم تبخیر خورشیدی سطحی معرفی شده امکان استفاده از وزش باد در تمامی جهات می‌باشد. این سیستم تبخیر خورشیدی سطحی به استفاده از وزش باد در یک راستا مشخص محدود نمی‌شود و از آنجایی که باد در طول روز در جهات مختلفی می‌وزد می‌توان از این انرژی برای افزایش سرعت تبخیر استفاده کرد.

۳-۵- بررسی عملکرد سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای در روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی

به منظور بررسی عملکرد سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای در شرایط واقعی، دو روز از سال (انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی) مبنا مطالعه قرار گرفت. انقلاب تابستانی آغاز فصل تابستان است و در این روز منطقه وسیع‌تری از نیمکره

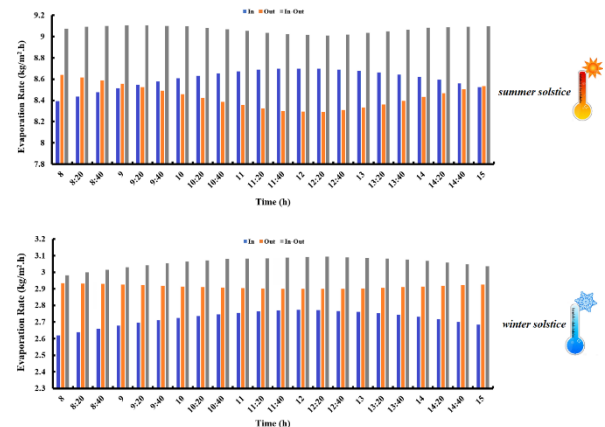
در معرض تابش مسقیم نور خورشید قرار می‌گیرد و دیواره‌های خارجی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای نقش اصلی را در جذب نور خورشید خواهند داشت. در طی روز انقلاب زمستانی از ساعت ۸ صبح تا ۳ بعد از ظهر سطح دیواره بیرونی سامانه تبخیر سطحی خورشیدی که در معرض تابش نور خورشید قرار می‌گیرد تقریباً ثابت خواهد بود. اما با نزدیک شدن به ساعت ۱۲ ظهر در این روز و تابش عمودتر خورشید بر سامانه تبخیر سطحی خورشیدی سهم دیواره‌های داخلی در جذب نور خورشید بیشتر خواهد شد. همچنین در شرایطی که هر دو دیواره داخلی و خارجی به عنوان جاذب نور عمل می‌کنند با نزدیک شدن به ساعت ۱۲ ظهر سهم دیواره‌های داخلی در جذب نور خورشید افزایش یافته و منجر به بیشتر شدن نرخ تولید بخار می‌شود.

شکل ۱۲ توزیع دمای سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای را در ساعت ۱۲ ظهر در انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی نشان می‌دهد. دمای سطوح داخلی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای که وظیفه جذب انرژی خورشیدی و جلوگیری از تلفات انرژی تابشی را بر عهده دارند با قرار گرفتن در معرض نور خورشید افزایش دما بیشتری نسب به سطوح خارجی داشته است. همچنین تولید بخار از دیواره خارجی سامانه تبخیر سطحی خورشیدی و استفاده از فرآیند سرمایش تبخیری منجر به کاهش دما دیواره بیرونی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای شده است. سطوح داخلی که در معرض تابش نور خورشید قرار گرفته و افزایش دما داشته است می‌توانند این انرژی حرارتی را از طریق انتقال حرارت رسانش به دیواره‌های مجاور منتقل کنند. همچنین در این ساختار امکان انتقال انرژی از طریق انتقال حرارت تابشی و انتقال حرارت همرفتی برای دیواره‌های دور از محل جذب انرژی خورشیدی فراهم می‌باشد. این ساختار استوانه‌ای توخالی می‌تواند به خوبی تلفات حرارتی ناشی از بازتاب نور خورشید و تشعشعات حرارتی را کاهش دهد.



شکل ۱۱) توزیع شار حرارتی خورشیدی در روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی.

فراهم شود. اما در شرایطی که صرفاً دیواره خارجی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای توخالی به عنوان جاذب نور خورشید عمل کرده است در هر دو روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی در حدود ساعت ۱۲ ظهر نرخ تولید بخار به کمترین مقدار خود رسیده است. همچنین در شرایطی که هر دو دیواره داخلی و خارجی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای توخالی به عنوان جاذب نور خورشید عمل کرده بیشترین میزان نرخ تولید بخار نسبت به دو حالت قبل در هر دو روز اتفاق افتاده است و در حدود ساعت ۱۲ ظهر در انقلاب تابستانی نرخ تولید بخار به کمترین مقدار و در انقلاب زمستانی به بیشترین مقدار رسیده است.

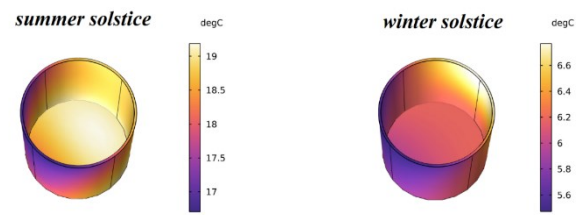


شکل ۱۰) نرخ تولید بخار سیستم تبخیر خورشیدی سطحی در دو روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی.

شکل ۱۱ توزیع شار گرمای خورشیدی را در روزهای انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی هر دو دیواره داخلی و خارجی سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای به عنوان جاذب نور خورشید عمل می‌کنند. با توجه به اینکه شهر تهران در نیمکره شمالی قرار دارد در روز انقلاب تابستانی تابش نور خورشید بر سامانه تبخیر سطحی استوانه‌ای تقریباً به صورت عمود می‌باشد و سطح بزرگتری از دیواره داخلی استوانه در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار خواهد گرفت و این دیواره نقش اصلی را در جذب نور خورشید خواهد داشت. در این روز با نزدیک شدن به ساعت ۱۲ ظهر و تابش عمودی نور خورشید بر سامانه تبخیر سطحی خورشیدی سطح بیشتری از دیواره داخلی استوانه در معرض تابش مستقیم نور خورشید قرار خواهد گرفت و سهم دیواره‌های بیرونی سامانه تبخیر سطحی خورشیدی در جذب نور خورشید کاهش خواهد یافت. همچنین در شرایطی که هر دو دیواره داخلی و خارجی به عنوان جاذب نور عمل می‌کنند با نزدیک شدن به ساعت ۱۲ ظهر سهم دیواره‌های خارجی در جذب نور خورشید کاهش یافته و منجر به کمتر شدن نرخ تولید بخار می‌شود.

اما مطابق شکل ۱۱ در روز انقلاب زمستانی با توجه به تابش مایل نور خورشید تنها سطح کوچکی از دیواره داخلی استوانه در طی روز

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت اصول اخلاقی را مد نظر قرار داده‌اند.
تعارض منافع: مطالب این پژوهش تعارض منافی با فرد یا نهادی ندارد.



شکل ۱۲) توزیع دمایی سیستم تبخیر خورشیدی سطحی استوانه‌ای در ساعت ۱۲ ظهر.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نرخ تولید بخار و راندمان یک سیستم تبخیر خورشیدی سطحی با مکانیزم انتقال آب الهام گرفته شده از طبیعت مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق عملکرد سیستم تبخیر خورشیدی سطحی با تغییر پارامترهای محیطی بررسی شد. همچنین تأثیر زاویه تابش نور خورشید بر میزان تولید بخار در روز انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی در شهر تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اصلی حاصل از پژوهش عبارتند از:

- افزایش دمای هوای محیط منجر به بهبود نرخ تولید بخار می‌شود. به طوری که افزایش دمای هوای محیط از ۱۰ درجه سلسیوس به ۵۰ درجه سلسیوس نرخ تولید بخار را ۲۲۰ درصد افزایش می‌دهد. اما با افزایش رطوبت نسبی هوای محیط به دلیل عدم تمایل هوا به جذب بخار آب سرعت تولید بخار کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش رطوبت نسبی هوای محیط از ۳۰ درصد به ۷۰ درصد نرخ تولید بخار ۸۵/۷ درصد کاهش می‌یابد.

- استفاده از جریان هوای همرفتی منجر به کاهش رطوبت در سطح تبخیر و افزایش نرخ تولید بخار می‌شود. استفاده از جریان باد با سرعت ۲ متر بر ثانیه نسبت به شرایط عدم وزش باد می‌تواند نرخ تولید بخار را ۳۷۳ درصد افزایش دهد. همچنین با کاهش دمای سطح تبخیر امکان دریافت انرژی بیشتر از محیط نیز فراهم خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد دیواره‌های بیرونی سامانه تبخیر سطحی نقش مهم‌تری نسبت به دیواره‌های داخلی در تولید بخار خواهند داشت. زیرا جریان چرخشی داخل استوانه باعث افزایش رطوبت نسبی فضای داخلی آن شده است.
- افزایش شدت تابش نور خورشید در ساختارهای هندسی مشابه به دلیل کاهش انرژی دریافتی از محیط منجر به افت ضریب افزایش نرخ تبخیر می‌شود.

- در انقلاب تابستانی سطوح داخلی و در انقلاب زمستانی سطوح خارجی نقش اصلی را در جذب انرژی خورشیدی ایفا می‌کنند. لذا صرفاً استفاده از سطوح داخلی یا خارجی سامانه تبخیر سطحی خورشیدی استوانه‌ای با هدف جداکردن سطح تبخیر از سطح جذب نور خورشید نمی‌تواند عملکرد مناسبی را برای این سامانه در فصول مختلف سال با توجه به تغییر زاویه تابش نور خورشید فراهم کند.

علائم

C	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
D	ضریب دیفیوژن (m^2s^{-1})
F	قدرت کسب کسری
J	پرتوایی (Wm^{-2})
K	ضریب نرخ تبخیر (ms^{-1})
M	جرم مولی (gmol^{-1})
P	فشار (Pa)
Q	منبع گرما (Wm^{-2})
q	شار حرارتی رسانش (Wm^{-2})
t	زمان (s)
T	دما (K)
u	سرعت (ms^{-1})

علائم یونانی

ϵ	ضریب انتشار
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ثابت استفان بولتزمن ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$)
ϕ	رطوبت نسبی

زیرنویس‌ها

amb	محیط
a	هوا
p	فشار
vd	اتلاف لزجی

منابع

- 1- Sobhani, M. and H. Ajam, Experimental Study of the Performance of the Solar Still with Sliding Absorber Plate and Equipped with a Wave Maker. Modares Mechanical Engineering, 2024. 24(3): p. 165-176.
- 2- Howard, G., et al., Domestic water quantity, service level and health. 2020: World Health Organization.
- 3- Yekani Motlagh, S., et al., Numerical Simulation of Single Slope Solar Still with Setting Rectangular, Triangular and Wavy Barriers on the Side Walls. Modares Mechanical Engineering, 2024. 24(2): p. 97-110.
- 4- Shaulsky, E., et al., Membrane distillation assisted by heat pump for improved desalination energy efficiency. Desalination, 2020. 496: p. 114694.
- 5- Wang, Z., et al., Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination. Science advances, 2019. 5(7): p. eaax0763.

- environmental energy and convective flow. *Chemical Engineering Journal*, 2023. 466: p. 143281.
- 23- Liu, X., et al., Evaporation rate far beyond the input solar energy limit enabled by introducing convective flow. *Chemical Engineering Journal*, 2022. 429: p. 132335.
- 24- Zhang, C., et al., Distinct stage-wise environmental energy harvesting behaviors within solar-driven interfacial water evaporation coupled with convective airflow. *Nano Energy*, 2023. 107: p. 108142.
- 6- Barghi jahromi, M.s., v. kalantar, and M.H. Dehestani Bafghi, Experimental Investigation and Exergy Analysis of Solar Parabolic Dish System with Automatic Tracking for Domestic Applications. *Modares Mechanical Engineering*, 2023. 23(12): p. 641-649.
- 7-Farhadi, M., S.S. Hosseini, and K. Sedighi, Experimental Study of Solar Distillation using PCM and Flow Turbulators. *Modares Mechanical Engineering*, 2017. 17(6): p. 117-127.
- 8- Liu, G., J. Xu, and K. Wang, Solar water evaporation by black photothermal sheets. *Nano Energy*, 2017. 41: p. 269-284.
- 9- Heshmati, F.Z., et al., Improving the performance of graphite-based solar water desalination system by using plasmonic nickel nanoparticles and engineering the structure. *Journal of Applied Research of Chemical -Polymer Engineering*, 2022. 6(3): p. 75-85.
- 10- Lin, Y., et al., Solar steam generation based on the photothermal effect: from designs to applications, and beyond. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019. 7(33): p. 19203-19227.
- 11- maleki, m., F. Arabpour Roghabadi, and S.M. Sadrameli, Water desalination using solar steam generation systems based on graphite photothermal material. *Journal of Applied Research of Chemical - Polymer Engineering*, 2022. 6(1): p. 49-61.
- 12- Liu, Y., et al., Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic gauze for the solar evaporation enhancement at the air-water interface. *ACS applied materials & interfaces*, 2015. 7(24): p. 13645-13652.
- 13- Wang, X., et al., Multilayer polypyrrole nanosheets with self-organized surface structures for flexible and efficient solar-thermal energy conversion. *Advanced Materials*, 2019. 31(19): p. 1807716.
- 14- Gao, X., et al., Synthesis of hierarchical graphdiyne-based architecture for efficient solar steam generation. *Chemistry of Materials*, 2017. 29(14): p. 5777-5781.
- 15- Ding, D., et al., A metal nanoparticle assembly with broadband absorption and suppressed thermal radiation for enhanced solar steam generation. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021. 9(18): p. 11241-11247.
- 16- Ni, G., et al., Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration. *Nature Energy*, 2016. 1(9): p. 1-7.
- 17- Chen, C., Y. Kuang, and L. Hu, Challenges and opportunities for solar evaporation. *Joule*, 2019. 3(3): p. 683-718.
- 18- Zhao, F., et al., Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. *Nature nanotechnology*, 2018. 13(6): p. 489-495.
- 19- Wu, X., et al., All-cold evaporation under one sun with zero energy loss by using a heatsink inspired solar evaporator. *Advanced Science*, 2021. 8(7): p. 2002501.
- 20- Wang, Y., et al., Reversing heat conduction loss: extracting energy from bulk water to enhance solar steam generation. *Nano Energy*, 2020. 78: p. 105269.
- 21- Li, J., et al., Over 10 kg m⁻² h⁻¹ evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous carbon foam. *Joule*, 2020. 4(4): p. 928-937.
- 22- Li, J., et al., Ultrahigh solar vapor evaporation rate of super-hydrophilic aerogel by introducing