ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(02):97-110.

Numerical Simulation of Single Slope Solar Still with Setting Rectangular, Triangular and Wavy Barriers on the Side Walls

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Yekani Motlagh S.[1*],
Azizpour M.[2],
Amin Harki Kay S.[2],
Mansouri H.[2]

How to cite this article
Yekani Motlagh S, Azizpour M, Amin Harki Kay S, Mansouri H. Numerical Simulation of Single Slope Solar Still with Setting Rectangular, Triangular and Wavy Barriers on the Side Walls. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(02):97-110.*

[1] Department of Mechanical Engineering, Urmia university of technology, Urmia, Iran.
[2] Urmia university of technology, Urmia, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Urmia university of technology, Urmia, Iran.

s.yekani@uut.ac.ir

Article History
Received: December 27, 2023
Accepted: May 7, 2024
ePublished: June 15, 2024

ABSTRACT

Deficiency of potable water has created many problems for human and human society, Therefore, The production of fresh water from saline water is an important issue. One of the method of production fresh water from saline water is the use of solar stills. This paper is the numerical simulation of the conventional solar stills with setting Rectangular, Triangular, Wavy barriers on the left and right walls inside the solar still. Setting barriers causes a change in the pattern of humid airflow in the solar still that it affect water productivity and convective heat transfer rate. Also, changes in the size and number of barriers cause changes it will be in the result. The continuity, momentum, energy and concentration equations are discretized by finite volume method and the results are presented as flow function and concentration and temperature contours. The simulation results show that setting wavy barriers with A=0.01(m) and N=2 at left wall and A=0.075(m) and N=5 at right wall water productivity and convective heat transfer rate can be increased by about 31% and 31.34%.

Keywords Solar Still, Water Productivity, Barriers, Flow Pattern, Vortex

CITATION LINKS

1- Effect of blade installation on ... 2- Numerical and experimental study of ... 3- A numerical investigation of the ... 4- Numerical investigation of wind velocity ... 5- The use of passive baffles to increase ... 6- Productivity enhancement of a single ... 7- Experimental and water quality analysis of ... 8- Experimental performance evaluation of single ... 9- Experimental performance analysis of ... 10- Modelling and performance enhancement ... 11- Energy and exergy analysis of a new ... 12- Performance evaluation of a modified design ... 13- Natural convection in a cavity with a wavy ... 14- New development in the theory of heat and ... 15- Productivity estimation of a single-slope solar ... 16- Solar water distillation: the roof type ... 17- Natural convection and wall condensation or evaporation ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی عددی آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار با قرار دادن موانع مستطیلی، مثلثی و موج‌دار بر روی دیواره‌های جانبی آن

صابر یکانی مطلق[1*] ، محمد عزیزپور[2] ، سیامک امین هرکی کای[2]، حامی منصوری[2]

[1] دانشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

[2] دانشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

کمبود آب آشامیدنی مشکلات متعددی را برای جامعه بشری ایجاد کرده است. از این‌رو تولید آب شامیدنی از آب شور دریاها از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از روش‌های تولید آب شیرین از آب شور دریا، استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. در کار حاضر به شبیه‌سازی عددی آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی تک کابینه همراه با قراردادن موانع مستطیلی، مثلثی، موج‌دار بر روی دیواره های چپ و راست آب شیرین‌کن پرداخته شده است. قراردادن موانع باعث تغییر در الگو جریان هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن شده که بر نرخ انتقال حرارت و میزان تولید آب شیرین تاثیر می‌گذارد. همچنین تغییر در اندازه موانع و تعداد آنها، باعث تغییرات در نتایج می‌شود. آب شیرین‌کن با موانع شبیه‌سازی شده است، برای شبیه‌سازی ذکر شده، معادلات بقای پیوستگی، مومنتوم، انرژی و غلظت به روش حجم محدود گسسته‌سازی شده و توسط نرم افزار اوپن فوم (Open Foam) حل شده است و نتایج به صورت تابع جریان و کانتورهای غلظت ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با قراردادن موانع موج‌دار با تعداد و اندازه مشخص بر روی دیواره‌های چپ و راست آب شیرین‌کن، نرخ انتقال حرارت و میزان تولید آب شیرین به ترتیب حدود ۳۱/۳٤ % و ۳۱ % نسبت به حالت سنتی افزایش پیدا کرده است.

کلیدواژه‌ها: آب شیرین‌کن خورشیدی، تولید آب شیرین، مانع، الگوی جریان، گردابه

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

*نویسنده مسئول: s.yekani@uut.ac.ir

۱- مقدمه

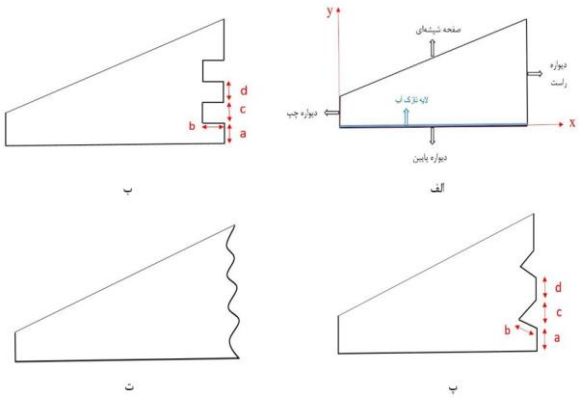
اگرچه حدود ۷۱٪ از سطح کره زمین را آب پوشانده است اما تنها ۰/۱٪ آب‌های شیرین موجود در دسترس انسان‌ها است [1]. افزایش روز افزون جمعیت جهان، توسعه صنایع مختلف، افزایش آلودگی منابع آب شیرین، باعث بحران کم‌آبی در جهان شده است. برای حل این مشکل محققین در تلاش هستند تا با روش‌های مختلفی آب شور دریاها را به آب شیرین و قابل استفاده تبدیل کنند. یکی از روش‌های نمک‌زدایی آب شور، استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی است. در آب شیرین‌کن خورشیدی آب شوری که وارد دستگاه می‌شود، توسط نور خورشید که از سطح شیشه‌ای دستگاه عبور می‌کند گرم می‌شود با بالا رفتن دمای آب داخل کابینه تبخیر سطحی صورت می‌گیرد در طی فرایند تبخیر نمک و سایر املاح معدنی در کف دستگاه باقی می‌ماند و بخار خالص آب به سمت بالا حرکت می‌کند و با برخورد به سطح شیشه‌ای تقطیر شده و در ظرفی جمع‌آوری می‌گردد. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بدلیل استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید هیچ‌گونه آلودگی زیست محیطی ایجاد نمی‌کنند و همچنین از نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌ها مقرون به صرفه‌تر هستند. به طور معمول اغلب مناطقی دچار کمبود آب آشامیدنی می‌شوند که دارای آب و هوای گرم و خشک هستند و تابش نور خورشید در آن مناطق زیاد است، از این رو استفاده از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی در این مناطق می‌تواند کارآمد باشد. مهم‌ترین مشکل آب شیرین‌کن خورشیدی عملکرد نسبتا پایین آنها در تولید آب شیرین است به طوری‌که میزان تولید روزانه آب شیرین از یک دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی تک کابینه بین ۰/۵ تا ۲/۵ کیلوگرم بر متر مربع و بازدهی آن از ۵٪ تا ۴۰٪ متغیر است [2]. از همین رو تحقیق و آزمایش‌های متعددی جهت بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد. در سال ۲۰۲۳ غنی حامد و همکاران [3] تحلیل عددی با موضوع طراحی جدیدی از کف آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار با قرار دادن موانعی از جنس فولاد ضد زنگ با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن انجام دادند. با توجه به نتایج کار آنها مشخص شد تغییر اندازه موانع در مقایسه با تغییر شکل اثر بزرگتری بر نرخ انتقال حرارت و میزان تولید آب شیرین داشت. از این رو هنگامی که دمای سطح شیشه‌ای آب شیرین‌کن و کف آب شیرین‌کن به ترتیب ۶۱/۹ و ۷۱/۹ درجه سانتی‌گراد بود بازده آب شیرین‌کن در مقایسه با حالت سنتی حدود ۳۸/۲٪ بهبود یافت. در سال ۲۰۲۲ محمد همت و همکاران [4] به بررسی عددی تاثیر سرعت باد بر نرخ تبخیر در آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار پرداختند. بادهای با سرعت ۲/۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند، نتایج حاصل از کار آنها نشان می‌دهد افزایش سرعت باد تا ۱۵ متر بر ثانیه باعث کاهش نرخ تولید آب شیرین شد. در سال ۲۰۲۱ بن‌حاجی سراج و همکاران [5] به بررسی عددی تاثیر قراردادن بافل‌های عمودی در داخل آب شیرین‌کن بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد پرداختند، نتایج کار آنها نشان داد که بافل‌ها تاثیر قابل توجهی بر روی میدان جریان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد داشته است و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد که ارتباط مستقیم با بازده آب شیرین‌کن دارد را حدود ۲۰۲٪ افزایش داد. در سال ۲۰۲۱ کارثیک و همکاران [6] به بررسی تجربی بهبود میزان تولید آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی تک شیب‌دار با قرار دادن سنگ های در کف آب شیرین‌کن پرداختند. سنگ‌ها در طول روز گرمای حاصل از تابش نور خورشید را در خود ذخیره کرده و و در طول شب گرما را آزاد می‌کند و علاوه بر این الگوی جریان سیال

را در پایین آب شیرین‌کن تغییر می‌دهد. نتیجه حاصل از کار آنها نشان داد میزان تولید آب شیرین حدود ۱۸/۶٪ افزایش یافت. در سال ۲۰۲۰ پانچال و همکاران [7] بررسی تجربی با موضوع قرار دادن پره‌های عمودی و شیب دار با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار انجام دادند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که قرار دادن پره‌های عمودی و شیب‌دار در کف آب شیرین‌کن بازدهی آب شیرین کن را نسبت به حالت سنتی حدود ۲۴/۱۹٪ و ۲۶/۷۷٪ بهبود بخشید. در سال ۲۰۱۸ هاردیک جانی و همکاران [8] به بررسی تجربی قراردادن موانع توخالی به شکل‌های دایروی و مربعی بر روی دیواره پایین آب شیرین کن خورشیدی پرداختند. در این آزمایش عمق‌های ۱۰ ، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر برای آب موجود در بستر آب شیرین‌کن در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از کار آنها بیان کرد که بیشترین بازده مربوط به عمق ۱۰ میلی‌متر بوده به طوری‌که میزان تولید روزانه آب شیرین، آب شیرین‌کن خورشیدی در عمق ۱۰ میلی‌متر با موانع مربعی و دایروی به ترتیب ۰/۹۶۷ و ۱/۴۹۱ کیلوگرم بر متر مربع بود. در سال ۲۰۱۷ رابهی و همکاران [9] به بررسی تجربی نحوه عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار با قراردادن پره‌های میخی شکل بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج نشان داد که در شرایط کامل یکسان میزان تولید آب شیرین از مقدار ۲/۴۷۱ لیتر بر متر مربع به حدود ۲/۸۳ لیتر بر متر مربع رسید. در سال ۲۰۱۷ وابی‌هاو و همکاران [10] به بررسی عددی آب شیرین‌کن خورشیدی تک‌شیب‌دار با نرم‌افزار انسیس فلوئنت و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند، نتایج حاصل از کار آنها تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشت. علاوه براین به بررسی تاثیر عمق آب در کف آب شیرین‌کن بر میزان تولید آب شیرین پرداختند، نتایج حاصل از کار آنها نشان داد عمق کم آب در کف آب شیرین‌کن بر بهبود عملکرد آب شیرین‌کن موثر است. در سال ۲۰۱۰ آکپینار و همکاران [11] به بررسی آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار با گرمکن هوایی همراه با سه نوع مانع مختلف که بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن تعبیه شدند، پرداختند. دبی جریان هوای گرم ورودی به آب شیرین‌کن در حدود ۰/۰۰۷۴ و ۰/۰۰۵۲ کیلوگرم بر ثانیه بود. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد بیشترین بازدهی آب شیرین‌کن مربوط به هنگامی است که از جریان هوای گرم با موانع نوع دوم استفاده شد. در سال ۲۰۰۸ عبدالله و همکاران [12] عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار را با پله‌ای کردن دیواره پایین آب شیرین‌کن و همچنین قراردادن آینه بر روی دیواره‌های داخلی بررسی کردند. آینه‌ها نور خورشید تابیده شده رو منعکس می‌کرد و پله‌ای شدن بستر آب شیرین‌کن باعث تغییر الگوی جریان آب داخل آب شیرین‌کن شد. با این تغییرات ایجاد شده عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی حدود ۳۸۰٪ بهبود یافت. در سال ۲۰۰۶ مناب کومار و همکاران [13] به بررسی انتقال حرارت جابه جایی آزاد در داخل حفره (Cavity) که دیواره راست آن به صورت موج‌دار است پرداختند. نتایج آنها نشان داد حضور دیواره موج دار اثر مطلوبی بر افزایش انتقال حرارت موضعی و میدان جریان سیال دارد.

با توجه به تاریخچه ذکر شده مشاهده می‌گردد قراردادن موانع و پره‌ها در داخل آب شیرین‌کن عملکرد آن را بهبود بخشیده است. با این وجود تحقیق کمتری بر روی قراردادن موانع بر روی دیواره‌های جانبی آب شیرین‌کن خورشیدی صورت گرفته است، در حالی که مشاهده شده است قراردادن موانع بر روی دیواره‌های جانبی حفره اثر مطلوبی بر انتقال حرارت داشته است. از این رو در کار حاضر، قرار دادن موانع با هندسه های مستطیلی، مثلثی و موج‌دار با تعداد و اندازه‌های متفاوت بر روی دیواره سمت چپ و راست آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار بررسی می‌شود. هدف از قرار دادن موانع ایجاد تغییر در الگوی جریان هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن است. در کار حاضر تاثیر نوع شکل موانع، تعداد موانع، اندازه موانع و نحوه‌ی قرارگیری آنها، در الگوی جریان، میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت بررسی خواهد شد.

۲- هندسه مسئله

در مطالعه حاضر از آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار که ابعاد هندسه آن در کار عددی مرجع [14] ذکر شده به طوری‌که ارتفاع دیواره سمت راست H_R =۰/۴۷ ، ارتفاع دیواره سمت چپ H_L =۰/۱ و طول دیواره پایین L = ۰/۹۸ متر است به عنوان هندسه اولیه مسئله استفاده شده است. در شکل ۱- الف نمایی از آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار سنتی آورده شده است.



شکل ۱) الف-شکل نمونه ای از آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار سنتی ب- شکل نمونه ای از آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار همراه با موانع مستطیلی پ- شکل نمونه ای از آب شیرین‌کن خورشیدی همراه با موانع مثلثی ت- شکل نمونه ای از آب شیرین‌کن خورشیدی همراه با موانع موجدار

۲-۱- هندسه مسئله با موانع مستطیلی

موانع مستطیلی با تعداد و اندازه‌های مختلفی که در جدول ۱ ذکر شده‌اند در سمت چپ و راست آب شیرین‌کن قرار داده شده‌اند. نمونه‌ای از آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار همراه با موانع مستطیلی در شکل ۱- ب آورده شده است.

۲-۲- هندسه مسئله با موانع مثلثی

موانع مثلثی با تعداد و اندازه‌های مختلفی که در جدول ۱ ذکر شده‌اند در سمت راست آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار قرار داده شده است. نمونه‌ای از آب شیرین‌کن خورشیدی همراه با موانع مثلثی در شکل ۱- پ آورده شده است.

۲-۳- هندسه مسئله با موانع موج‌دار

موانع موج‌دار با معادله کسینوسی با تعداد قله و دامنه‌ی متغیر که نحوه تغییرات در جدول ۱ آورده شده، در سمت راست و چپ آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار قرار داده شده است. نمونه‌ای از آب شیرین‌کن خورشیدی همراه با موانع موج‌دار در شکل ۱- ت آورده شده است. معادله موج کسینوسی موانع سمت راست و چپ به ترتیب به صورت (۱) و (۲) است.

$$x = 0.98 - A(1 - COS(NW\pi y)) \quad (۱)$$

$$x = A(1 - COS(NW\pi y)) \quad (۲)$$

A، N به ترتیب نصف دامنه موج، تعداد قله است و W عدد ثابتی است برای معادله موج (۱) برابر ۴/۲۵۶ و برای معادله موج سمت (۲) برابر ۲۰ است.

۳- معادلات حاکم

در آب شیرین‌کن خورشیدی با هندسه های ذکرشده با توجه به اینکه عدد بی‌بعد رایلی در محدوده 10^3 تا 10^4 است از این رو جریان آرام است. تغییرات سرعت و دما در جهت عمود بر صفحه (z) وجود ندارد پس می‌توان جریان را دو بعدی فرض کرد. علاوه بر این جریان پایا فرض می‌شود. همچنین دمای دیواره های بالا و پایین در مقدار ثابت T_g و T_w بوده و دیواره های جانبی عایق فرض شده است. سیال هوای مرطوب، تراکم ناپذیر، با خصوصیات فیزیکی تابعی از دما در نظر گرفته شده و تلفات لزجت ناچیز فرض شده است. با فرض‌های بالا معادلات حاکم به صورت معادلات (۳-۷) خواهد بود.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۳)$$

که در آن u, v مولفه‌های بردار سرعت در راستای x, y هستند.

معادلات مومنتوم:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \quad (۴)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \beta_t g(T - T_g) + \beta_c g(c - c_g) \quad (۵)$$

که در آن u, v مولفه‌های بردار سرعت در راستای x, y همچنین p نشان دهنده میدان فشار وT بیانگر میدان دما، c نشان دهنده غلظت و پارامترهای ρ ، ϑ ، β_t ، β_c به ترتیب برابر چگالی، ویسکوزیته سینماتیکی، ضریب انبساط دمایی و حجمی هستند.

معادله انرژی:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (۶)$$

که در آن T نشان دهنده میدان دما و u, v مولفه‌های بردار سرعت در راستای x, y و α نشان دهنده ضریب پخش دمایی است.

معادله غلظت:

$$u\frac{\partial}{\partial x}(c_v) + v\frac{\partial}{\partial y}(c_v) = D_{AB}\left(\frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2}\right) \quad (۷)$$

که در آن c_v بیانگر غلظت سیال، u, v مولفه‌های بردار سرعت در راستای x, y و D_{AB} نشان دهنده ضریب نفوذ جرم است.

علاوه بر این برای محاسبه عدد ناسلت و میزان آب شیرین تولیدی از روابط زیر استفاده می‌شود [15].

$$Nu = \frac{-1}{(T_w - T_g)}\int_0^L \frac{\partial T}{\partial y}dx \quad (۸)$$

$$\dot{m} = \frac{-3600 \times D_{AB} \times \rho}{L}\int_0^L \frac{\partial c}{\partial y}dx \quad (۹)$$

روابط محاسبه میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت کار تحلیلی دانکل [16] به صورت زیر است:

برای محاسبه میزان تولید آب شیرین از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\dot{q}_{ev} = h_{ev}A_s(T_w - T_g) = \dot{m}L_v \quad (۱۰)$$

که در رابطه بالا $\dot{q}_{ev}$ نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی در طی فرایند تبخیر، h_{ev} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی A_s مساحت آب شیرین‌کن، $\dot{m}$ دبی جرمی، L_v گرمای نهان است.

h_{ev} از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$h_{ev} = 0.016273 \times 0.884(\Delta T)^{1/3} \times \frac{p_w - p_g}{T_w - T_g} \quad (۱۱)$$

در معادله بالا p_w و p_g به ترتیب فشار اشباع در دمای فیلم و شیشه هستند. که نحوه محاسبه آن در جدول ۳ اشاره شده است.

و برای محاسبه عدد ناسلت نیز رابطه زیر ارائه شده است:

$$Nu = 0.057 \times \left(\frac{\rho^2 g\beta C_p H^3 \Delta T}{K\mu}\right)^{1/3} \quad (۱۲)$$

جدول ۱) جدول مشخصات موانع مستطیلی، مثلثی، موجدار

	تعداد موانع	سمت	a	b	c	d	تعداد قله	نصف دامنه
مانع مستطیلی								
حالت ۱	۳	راست	۰/۰۲۳۵	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	–	–
حالت ۲	۳	راست	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	–	–
حالت ۳	۳	راست	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	–	–
حالت ۴	۳	راست	۰/۰۴۷	۰/۰۲۳۵	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	–	–
حالت ۵	۲	راست	۰/۰۹۴	۰/۰۲۳۵	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	–	–
حالت ۶	۲	راست	۰/۰۹۴	۰/۱۸	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	–	–
حالت ۷	۶	راست	۰/۰۲۳۵	۰/۰۱	۰/۰۴۷	۰/۰۲۳۵	–	–
حالت ۸	۱	راست	۰/۰۲۳۵	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	–	–	–
حالت ۹	۱	راست	۰/۲۵۶	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	–	–	–
حالت۱۰	۱	چپ	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	–	–	–
حالت۱۱	۱	چپ	۰/۰۴۷	۰/۱۵	۰/۰۴۷	–	–	–
مانع مثلثی								
حالت ۱	۳	راست	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	–	–
حالت ۲	۲	راست	۰/۰۹۴	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	–	–
حالت ۳	۱	راست	۰/۱۸۸	۰/۰۴۷	۰/۰۹۴	–	–	–
مانع موجدار								
حالت ۱	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۴۷
حالت ۲	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۳۰
حالت ۳	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۶۰
حالت ۴	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۷۰
حالت ۵	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۷۵
حالت ۶	–	راست	–	–	–	–	۵	۰/۰۸۰
حالت ۷	–	راست	–	–	–	–	۴	۰/۰۷۵
حالت ۸	–	راست	–	–	–	–	۶	۰/۰۷۵
حالت ۹	–	چپ راست	–	–	–	–	چپ=۲ راست =۵	چپ=۰/۰۱ راست=۰/۰۷۵
حالت ۱۰	–	چپ راست	–	–	–	–	چپ=۲ راست =۵	چپ=۰/۰۲۵ راست=۰/۰۷۵

جدول ۲) جدول مشخصات نمونه های مدنظر مسئله

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
زمان(hr)	۱۲:۵۰	۱۴:۵۳	۱۶:۴۷	۱۷:۴۹	۱۹:۴۲
دما سطح شیشه‌ای (°C)	۴۵/۲۶	۵۵/۶۳	۴۷/۷۶	۴۰/۶۴	۲۷/۶۷
دمای دیواره پایین(°C)	۵۳/۱	۶۴/۲	۵۶/۳۳	۴۸/۴۸	۳۲/۹۶
غلظت سطح شیشه‌ای	۰/۰۲۰۸	۰/۱۰۶۴	۰/۰۷۰۸	۰/۰۴۸۳	۰/۰۲۳۱
غلظت دیواره پایین	۰/۰۹۳۵	۰/۱۶۳۵	۰/۱۱۰۳	۰/۰۷۳۶	۰/۰۳۱۴

که در آن g، K، μ، ρ، C_p، H، β به ترتیب شتاب گرانش، ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته دینامیکی، چگالی، گرمای مخصوص، ارتفاع آب و ضریب انبساط دمایی است.

۴- مشخصات فیزیکی و شرایط مرزی مسئله

۴-۱- مشخصات فیزیکی مسئله

دیواره های چپ و راست آب شیرین‌کن عایق گرما و جرم است. اما دما و غلظت در دیواره پایین وسطح شیشه‌ای بالا به ترتیب با مقادیر $(T_w, C_{v|w})$ و $(T_g, C_{v|g})$ بیان می‌شود. این مقادیر با زمان تغییر می‌کنند، از این رو آب شیرین‌کن در ۵ زمان مختلف از طول روز که مقادیر T_w و T_g براساس مرجع [14] داده شده حل شده است. لازم به ذکر است که غلظت بر روی دیواره پایین و سطح شیشه‌ای بالا با در نظر گرفتن رطوبت نسبی ۱۰۰٪ در دما و فشار جزئی بخار آب در دیواره پایین و سطح شیشه‌ای محاسبه شده است. جدول ۲ پنج حالت بررسی شده در پنج زمان مختلف از روز را نشان می‌دهد.

برای محاسبه خواص ترمو فیزیکی هوای مرطوب موجود در داخل محفظه از روابط ارائه شده در جدول ۳ استفاده شده است که در آن $T_i = \frac{T_g+T_w}{2}$ است.

جدول ۳) مشخصات ترموفیزیکی هوای مرطوب

کمیت	فرمول
ضریب انبساط گرمایی (k^{-1})	$\beta_t = \frac{1}{(T_i + 273)}$
ضریب انبساط حجمی (k^{-1})	$\beta_c = \frac{1}{(\rho)} \times (\frac{M_a}{M_v} - 1)$
رسانایی حرارتی $(\mathrm{W\ m^{-1}\ K^{-1}})$	$\mathrm{k} = \mathrm{A_1 T_i} + \mathrm{A_2 T_i^2} + \mathrm{A_3 T_i^3} + \mathrm{A_4 T_i^4}$
چگالی $(kg\ m^{-3})$	$\rho = \frac{353.44}{(T_i + 273.15)}$
گرمای مخصوص هوای خشک $(\mathrm{J\ K^{-1} kg^{-1}})$	$C_{p,a} = 1000.0 + 2.510^{-7} T^3$
بخار آب گرمای مخصوص $(\mathrm{J\ K^{-1} kg^{-1}})$	$C_{p,v} = A_0 + A_1 T_i + A_2 T_i^2 + A_3 T_i^3$
گرمای مخصوص معادل $(\mathrm{J\ K^{-1} kg^{-1}})$	$C_p = (1 - W_v) C_{p,a} + W_v C_{p,v}$
لزجت دینامیکی $(\mathrm{kg\ m^{-1} s^{-1}})$	$\mu = A_1 T + A_2 T^2 + A_3 T^3 + A_4 T^4$
گرما نهان بخار آب $(\mathrm{J\ kg^{-1}})$	$h_{lv} = 2.7554 \times 10^6 - 3.464 T_w^2$
فشار بخار اشباع (Pa)	$P_{H_2O,Sat} = 10^5 \exp\ (18.79 - 0.0075T - \frac{5965.6}{T})$
دمای نقطه شبنم (℃)	$T_d = 66.67(B - \sqrt{B^2 - 178.968})$ $B = 18.79 - \ln\ (10^{-5} P_{H_2O})$
کسر مولی بخار	$RH = \frac{P_v}{P_{v.sat}} = \frac{x_v \bar{P}}{P_{v.sat}}$ (%) $x_v = \frac{W_v}{W_v + M^*(1 - W_v)}$
لزجت دینامیکی مخلوط $(\mathrm{N\ s\ m^{-2}})$	$\mu = \frac{\sqrt{18}\mu_v x_v + \sqrt{29}\mu_a x_a}{\sqrt{18} x_v + \sqrt{29} x_a}$
رسانایی حرارتی مخلوط $(\mathrm{W\ m^{-1}\ K^{-1}})$	$\mathrm{k} = \frac{x_v k_v}{x_v + x_a A} + \frac{x_a k_a}{x_a + x_v A}$ $A = \frac{[0.8876(1 + \sqrt{k_v / k_a})]^2}{3.6}$
ضریب نفوذ جرم $(m^2 s^{-1})$	$D_{AB} = \frac{1.87 \times 10^{-10} \times \mathrm{T}^{2.072}}{\mathrm{P}}$
فشار اشباع در دمای فیلم (Pa)	$p_w = \exp\ (25.317 - \frac{5144}{T_w + 273})$
فشار اشباع در دمای شیشه (Pa)	$p_g = \exp\ (25.317 - \frac{5144}{T_g + 273})$

جدول ۴) مقادیر ضرایب بسط چند جمله‌ای در روابط رسانایی حرارتی، گرمای مخصوص بخار آب، لزجت دینامیکی [17]

	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
هوای خشک (رسانای حرارتی)	-	۰/۹۶۵×۱۰$^{-۴}$	-۹/۹۶×۱۰$^{-۹}$	-۹/۳۱×۱۰^{۱۱}	۸/۸۸۲×۱۰$^{-۱۴}$
بخار آب (رسانای حرارتی)	-	۰/۳۴۹×۱۰$^{-۴}$	۱/۵۱۱×۱۰$^{-۷}$	۲/۵۷۶×۱۰$^{-۱۰}$	۲/۰۵۰×۱۰$^{-۱۲}$
بخار آب (گرمای مخصوص بخار آب)	۱۸۷۷/۸	-۰/۴۴۱	۱/۵۶۸×۱۰$^{-۳}$	-۷/۲۸۶×۱۰$^{-۷}$	-
هوای خشک (لزجت دینامیکی)	-	۷/۷۲۴×۱۰$^{-۸}$	-۵/۹۵۲×۱۰$^{-۱۱}$	۲/۷۱۳×۱۰$^{-۱۴}$	-
بخار آب (لزجت دینامیکی)	-	۵/۷۵۱×۱۰$^{-۸}$	-۱/۷۳۶×۱۰$^{-۱۰}$	۳/۹۰۱×۱۰$^{-۱۳}$	-۲/۶۹×۱۰$^{-۱۶}$

مقادیر ضرایب به کار رفته در رابطه‌ی رسانایی حرارتی، گرمای مخصوص بخار آب، لزجت دینامیکی در جدول ۴ ارائه شده است.

۴-۲- شرایط مرزی مسئله

در کار حاضر بنابر نام‌گذاری صورت گرفته در شکل ۱-الف شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی عددی به بیان زیر است. شرط مرزی سرعت عدم لغزش و عدم نفوذ برای تمامی دیواره‌ها و جداره شیشه‌ای اعمال شده است. $(u = v = 0)$ شرط مرزی دمایی در جداره شیشه‌ای و دیواره پایین شرط مرزی مقدار ثابت $(T_w ،T_g)$ که مقادیر آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است و دیواره‌های چپ و راست آب شیرین‌کن، عایق حرارتی در نظر گرفته شده‌اند $\left(\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0\right)$. برای پارامتر غلظت نیز در جداره شیشه‌ای و دیواره پایین شرط مرزی مقدار ثابت $(C_{v|g}$, $C_{v|w})$ که مقادیر آن‌ها در جدول ۲ ذکر شده است و دیواره‌های چپ و راست شرط مرزی گرادیان صفر در نظر گرفته شده است$\left(\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} = 0\right)$. در نهایت برای پارامتر فشار شرط مرزی گرادیان صفر برای تمامی دیواره‌ها و جداره شیشه‌ای اعمال شده است $\left(\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0\right)$.

۵- تنظیمات عددی، مطالعه شبکه، اعتبار سنجی

۵-۱- تنظیمات عددی و مطالعه شبکه

در کار حاضر، حلگر مسئله با زبان C++ توسعه داده شده است. از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و انتقال جرم استفاده شده است. از الگوریتم SIMPLE برای کوپل فشار-سرعت استفاده شده است. به منظور درون‌یابی ترم‌های جابه‌جایی و ترم‌های نفوذ در معادلات بقا به ترتیب از روش‌های مرتبه دو بالا دستی و مرتبه دو اختلاف مرکزی استفاده شده است.

شبکه محاسباتی به صورت سازمان یافته و یکنواخت در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از اینکه نتایج حاصل از شبیه‌سازی مستقل از تعداد شبکه است استقلال از شبکه برای هر سه نوع مانع انجام شده است. از آنجایی که آب شیرین‌کن خورشیدی با قرارگیری موانع موجدار حالت بحرانی است، نتایج حالت ۱ آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موجدار با تعداد مش‌های متفاوت در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد عدد ناسلت و میزان تولید آب شیرین با تعداد مش ۱۰۰۰۰ تقریبا ثابت مانده لذا این تعداد شبکه مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۲- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت نتایج عددی حاصل، میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی کار حاضر با سایر تحقیقات مقایسه شده است. میزان تولید آب شیرین کار حاضر با نتایج تجربی شفق [14] و کار تحلیلی دانکل [16] مقایسه شده است که رابطه ۱۰ بیانگر رابطه محاسبه میزان تولید آب شیرین کار تحلیلی دانکل است. نتیجه این مقایسه در جدول ۶ ارائه شده است. RMSE میزان تولید آب شیرین کار حاضر با کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۰/۰۳۷۷ و ۰/۰۶۴۲ است. همچنین عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن کار حاضر با کار تحلیلی دانکل [16] مقایسه شده و در جدول ۷ ارائه شده است. رابطه ۱۱ هم، رابطه محاسبه عدد ناسلت کار تحلیلی دانکل است. RMSE عدد ناسلت کار حاضر با کار تحلیلی حدود ۳/۲۱ است. نتایج این دو مقایسه نشان دهنده همخوانی نسبتا خوب کار حاضر با کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی است.

۶- نتایج

در این بخش به ترتیب به بررسی نحوه عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی، آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مستطیلی، آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مثلثی و آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موجدار پرداخته خواهد شد.

۶-۱- بررسی عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی

در ابتدا میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت برای آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی در پنج زمان مختلف از روز محاسبه شده است و نتایج آن به ترتیب در جداول ۶ و ۷ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان تولید آب شیرین که حدود ۰/۴۵۹کیلوگرم بر متر مربع در ساعت است در نمومه ۲ و در حوالی ساعت ۱۴ رخ می‌دهد با گذشت زمان و کاهش دما، میزان تولید آب شیرین کم شده به طوری‌که کمترین مقدار تولید آب شیرین که حدود ۰/۰۵۳۷ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت است درنمونه ۵ و حوالی ساعت ۱۹ رخ می‌دهد. نرخ انتقال حرارت نیز در حوالی ساعات ١٤ الی ١٥ بیشترین مقدار خود را داشته و در حوالی ساعت ۱۹ به کمترین مقدار خود می‌رسد. تابع جریان برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۲ ترسیم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد الگوی جریان در پنج نمونه تقریبا مشابه هم می‌باشد و تفاوت اصلی هر کدام از نمونه‌ها در قدرت گردابه هاست. در اثر نیروهای حجمی جریان بخار آب از دیواره پایین به سمت بالا حرکت کرده و با برخورد به سطح شیشه دمای خود را از دست داده و بر اثر نیروی گرانش دوباره به سمت پایین حرکت می‌کند، حرکت این‌چنین جریان بخار آب در داخل آب شیرین‌کن باعث تشکیل دو گردابه بزرگ و غیر هم جهت می‌شود که گردابه سمت راست به صورت ساعتگرد و گردابه سمت چپ به صورت پادساعتگرد می‌چرخند، و با چرخش این گردابه ها بر بالای آب موجود در کف دستگاه جریانی ایجاد می‌شود که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش تبخیر سطحی و به تبع آن افزایش میزان تولید آب شیرین می‌گردد. با توجه به شکل ۲ مقدار مجموع تابع جریان مثبت و منفی در حالت ۲ از سایر حالت‌ها بیشتر بوده پس میزان تولید آب شیرین در این حالت مقدار بیشینه را دارد. علاوه بر این در بعضی از نمونه‌ها گردابه‌های کوچکی در نزدیکی دیواره‌های جانبی ایجاد می‌شوند که باعث اتلاف انرژی جریان می‌شوند. همچنین کانتور های دما و غلظت در شکل ۳ ترسیم شده است که با توجه به این شکل‌ها می‌توان لایه‌های مرزی دمایی و جرمی را مشاهده کرد که بر روی دیواره پایین آب شیرین‌کن ایجاد شده است و تقریبا در مرکز آب شیرین‌کن به بیشینه ضخامت خود رسیده است.نرخ انتقال حرارت نیز در حوالی ساعات ۱۴ الی ۱۵ بیشترین مقدار خود را داشته و در حوالی ساعت ۱۹ به کمترین مقدار خود

۶-۲- بررسی عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مستطیلی

مشاهده شد که حداکثر میزان تولید آب شیرین در آب شیرین‌کن خورشیدی در نمونه ۲ اتفاق می‌افتد و مقدار آن حدود ۰/۴۵۹ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت است. حال با قرار دادن موانع مستطیلی بر روی دیواره چپ و راست آب شیرین‌کن، سعی در بهبود عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی شده است.

جدول ۵) نتایج استقلال از شبکه حالت ۱ آب شیرین‌کن خورشیدی با مانع موجدار

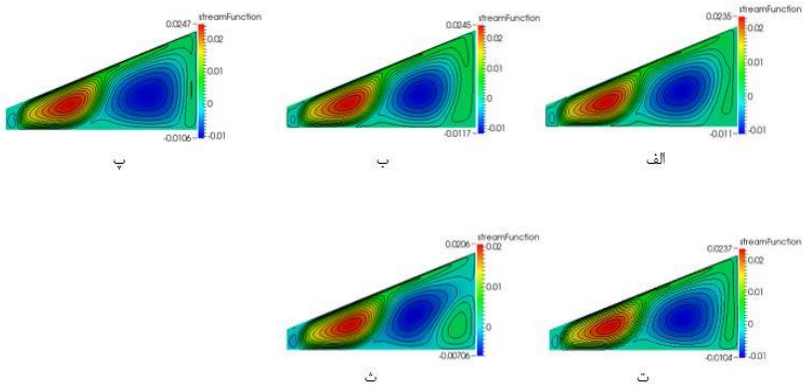
عدد ناسلت	میزان تولید آب شیرین $(\frac{kg}{m^2.h})$	تعداد مش
۳۲/۴۸	۰/۵۰۸۶	۷۰×۷۰
۳۱/۵۱	۰/۴۹۳۶	۸۰×۸۰
۳۱/۱۲	۰/۴۸۷۲	۹۰×۹۰
۳۰/۷۵	۰/۴۸۱۴	۱۰۰×۱۰۰

جدول ۶) مقایسه میزان تولید آب شیرین کار حاضر با نتایج شفق [14] و دانکل [16]

حالت	۱	۲	۳	۴	۵
شفق [14]	۰/۲۰۷	۰/۴۱۴۹	۰/۲۷۴۶	۰/۲۰۷۴	۰/۰۴۵۳
دانکل [16]	۰/۲۲۵	۰/۴۳۶	۰/۲۹۳۶	۰/۱۷۶۷	۰/۰۴۸۲
کار حاضر	۰/۲۴۴۸	۰/۴۵۹	۰/۳۱۳۵	۰/۱۹۲۹۱	۰/۰۵۳۷

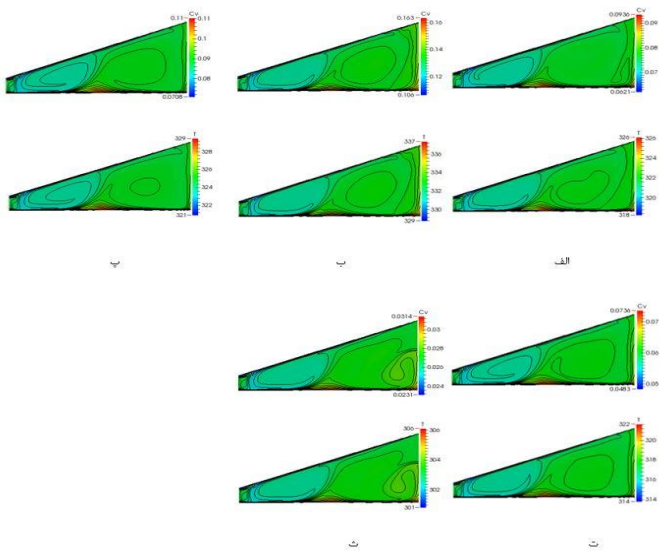
جدول ۷) مقایسه میانگین عدد ناسلت کار حاضر با نتیجه دانکل [16]

حالت	۱	۲	۳	۴	۵
دانکل [16]	۲۶/۱۹۱	۲۸/۹۸۶	۲۷/۵۳۲	۲۵/۳۰۶	۱۹/۷۶۱
کار حاضر	۲۶/۹۴۸	۲۹/۱۸	۲۸/۹	۲۷/۴۱	۱۷/۰۰۵

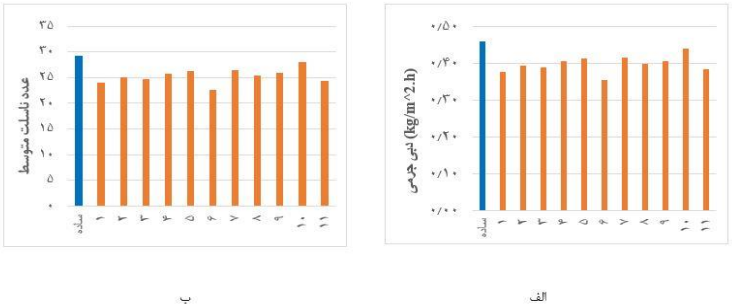


شکل ۲) الف-تابع جریان نمونه ۱ ب-تابع جریان نمونه ۲ پ-تابع جریان نمونه ۳ ت-تابع جریان نمونه ٤ ث-تابع جریان نمونه ۵

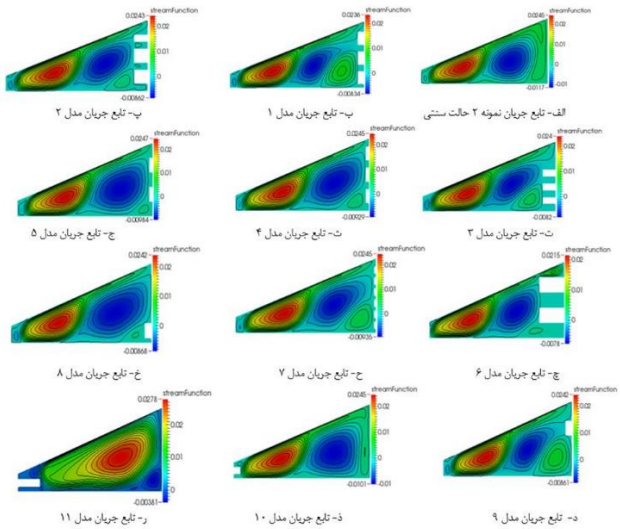
هدف از قرار دادن موانع مستطیلی در داخل آب شیرین‌کن تغییر در الگوی جریان هوای مرطوب داخل آب شیرین‌کن و به تبع آن ایجاد گردابه‌های جدید یا تقویت قدرت گردابه‌های قدیمی است که نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و باعث افزایش میزان تولید آب شیرین می‌شود. در جدول ۱-الف مشخصات موانع مستطیلی و نحوه قرارگیری آنها در آب شیرین‌کن ذکر شده است. شبیه‌سازی فقط برای نمونه ۲ انجام شده است و نتایج میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت، با نمونه ۲ حالت سنتی در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌گردد که میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت در تمامی حالت ها نسبت به حالت سنتی کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر تاثیر موانع مستطیلی بر روی آب شیرین‌کن، تابع جریان و کانتور غلظت به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ برای حالات مختلف رسم شده‌اند. باتوجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد با قرار دادن موانع مستطیلی در سمت راست آب شیرین‌کن، اندازه گردابه سمت راست کوچک‌تر شده و قدرت آن هم کاهش یافته است ولی بر گردابه سمت چپ تاثیر کمی گذاشته است. در بعضی از حالت ها گردابه سمت راست به دو گردابه ضعیف‌تر تقسیم شده است و همچنین گردابه‌های گوشه نیز در نزدیکی دیواره‌های جانبی تشکیل شده‌اند و در نتیجه باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و میزان تولید آب شیرین شده است. مشاهده می‌گردد که هر چه ابعاد و تعداد موانع مستطیلی زیاد می‌شود اثر نامطلوب‌تری بر عملکرد آب شیرین‌کن دارد. علاوه براین با قرار دادن مانع مستطیلی با ابعاد حالت ۹ در سمت چپ آب شیرین‌کن الگوی جریان هوای مرطوب داخل داستگاه در مقایسه با حالت های دیگر تغییر کرده است.



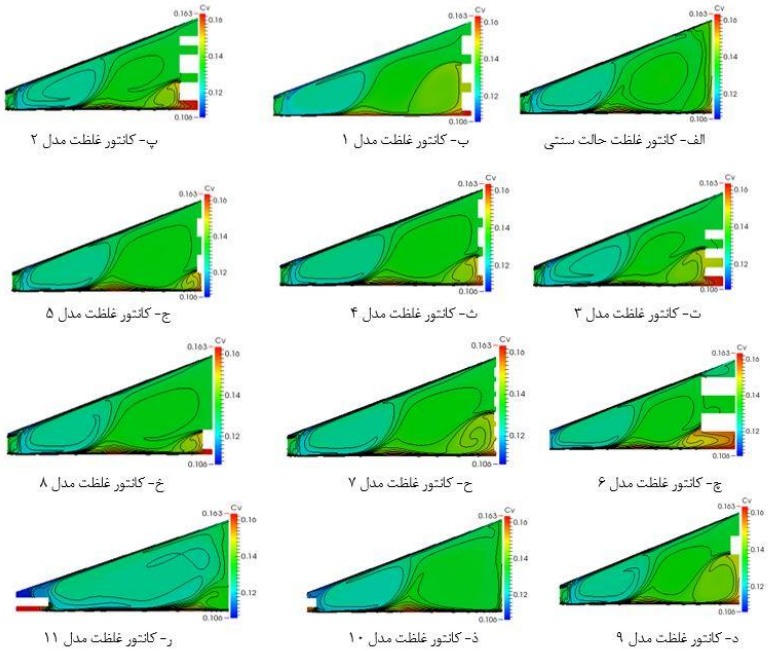
شکل ۳) الف-کانتور غلظت و دما نمونه ۱ ب- کانتور غلظت و دما نمونه ۲ پ- کانتور غلظت و دما نمونه ۳ ت- کانتور غلظت و دما نمونه ٤ ث- کانتور غلظت و دما نمونه ۵



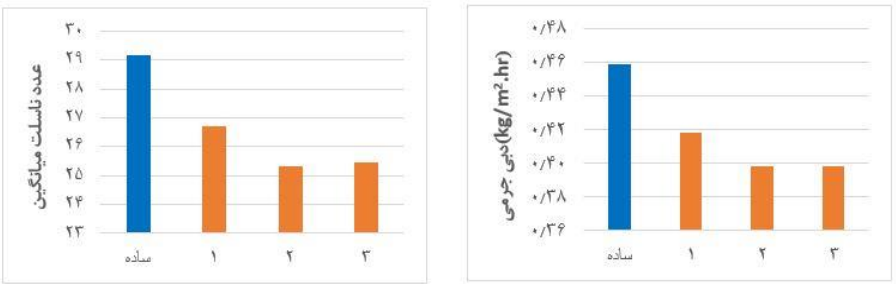
شکل ۴) الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین آب شیرین‌کن سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مستطیلی ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مستطیلی



شکل ۵) تابع جریان حالت‌های مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مستطیلی



شکل ۶) کانتور غلظت حالت‌های مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مستطیلی



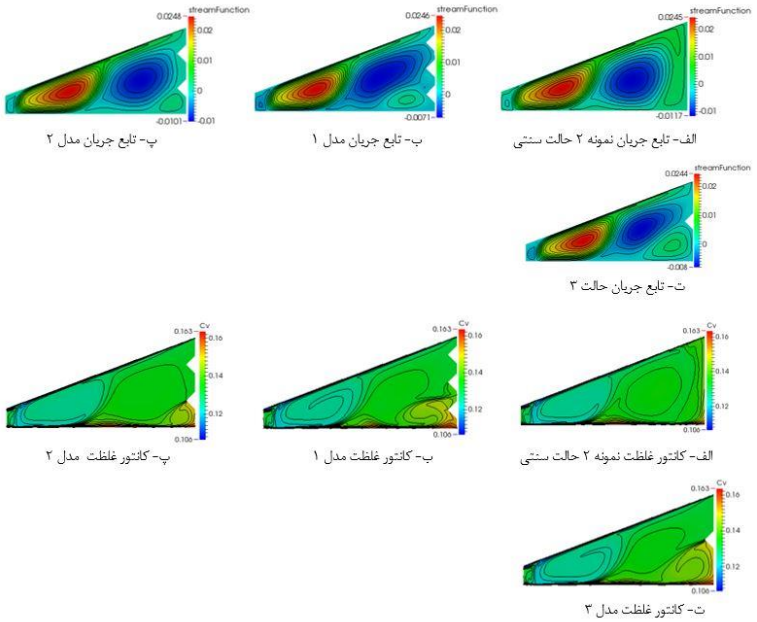
الف ب

شکل ۷) الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین آب شیرین‌کن سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مثلثی ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مثلثی

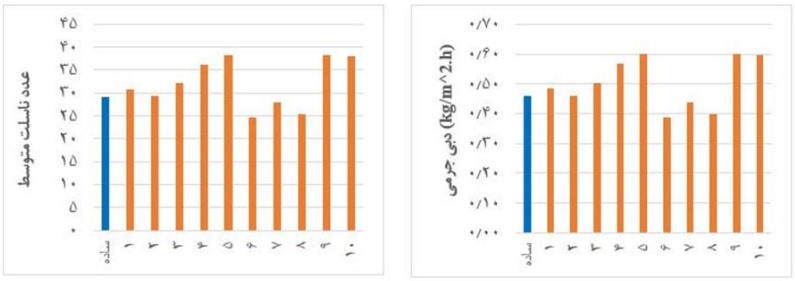
در حالت مذکور مانع مستطیلی گردابه های چپ و راست را با هم ادغام کرده و یک گردابه بزرگتر ایجاد کرده است اما چون تعداد گردابه‌ها کاهش یافته و از طرف دیگر قدرت گردابه ایجاد شده نیز به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش نیافته است در این حالت نیز بازده آب شیرین‌کن نسبت به حالت سنتی کاهش یافته است.

۶-۳- بررسی عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مثلثی

در بخش قبلی مشاهده شد که موانع مستطیلی اثری نامطلوب در عملکرد آب شیرین‌کن دارند، در این بخش از موانع مثلثی در سمت راست آب شیرین کن استفاده شده است. همانند حالت قبلی هدف از قرار دادن موانع مثلثی ایجاد گردابه‌های جدید و تقویت قدرت گردابه‌های قدیمی است. در جدول ۱-ب مشخصات موانع مثلثی و نحوه قرار گیری آنها در داخل آب شیرین‌کن ذکر شده است. تمامی حل های حالات مختلف فقط برای نمونه ۲ انجام گرفته است و نتایج میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت با نمونه ۲ حالت سنتی در شکل ۷ مقایسه شده‌اند، با توجه به مقادیر بدست آمده از حل ها مشاهده می‌گردد که میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت در تمامی حالات کاهش یافته است. برای بررسی دقیق تر تاثیر موانع مثلثی بر روی آب شیرین‌کن، تابع جریان و کانتور غلظت در شکل ۸ برای تمامی حالت‌های مختلف رسم شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌گردد موانع مثلثی اندازه گردابه سمت راست را کوچکتر کرده و آن را به سمت مرکز آب شیرین‌کن منتقل کرده است همچنین باعث کاهش قدرت گردابه سمت راست و افزایش قدرت گردابه سمت چپ شده است علاوه بر این، گردابه گوشه نیز در پایین آب شیرین‌کن در زیر مانع مثلثی به وجود آمده است.



شکل ۸) تابع جریان و کانتور غلظت حالت‌های مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع مثلثی



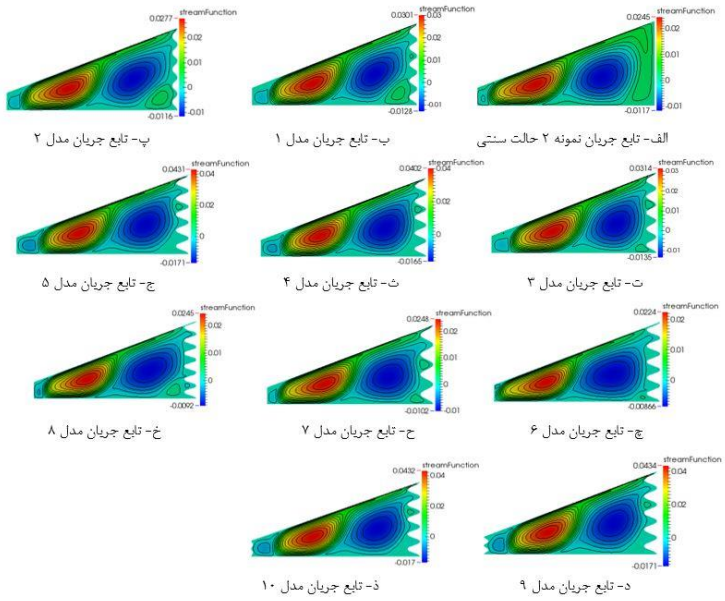
شکل ۹) الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین آب شیرین‌کن سنتی با آب شیرین‌کن با موانع موجدار ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی با آب شیرین‌کن با موانع موجدار

با این تغییرات ایجاد شده قدرت گردابه های اصلی کاهش یافته و در نتیجه نرخ انتقال حرارت و به تبع آن میزان تولید آب شیرین کاهش یافته است. در این بخش اندازه موانع ثابت بوده و فقط تعداد آنها تغییر کرده است که از شکل ۷ مشاهده می گردد که تعداد موانع کمتر اثر نامطلوب‌تری بر میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت دارد.

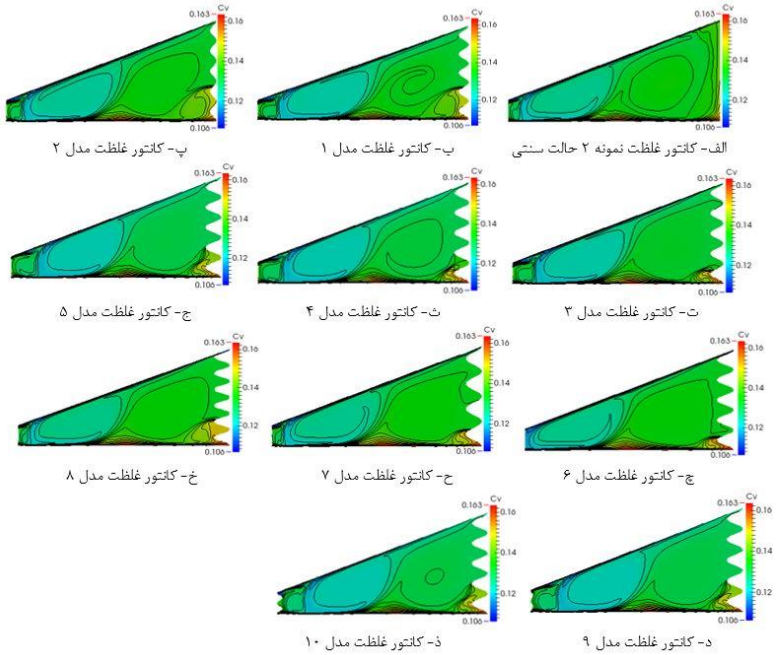
۶-۴- بررسی عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موجدار

مشاهده گردید که قرار دادن موانع مستطیلی و مثلثی در آب شیرین‌کن خورشیدی اثری نامطلوب در تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت دارد.

در این بخش از موانع موجدار در سمت راست و چپ آب شیرین‌کن استفاده شده است. هدف از قراردادن موانع موجدار نیز به مشابه موانع مستطیلی و مثلثی تقویت قدرت گردابه‌ها و یا ایجاد گردابه‌های جدید می‌باشد. در جدول ۱- پ مشخصات موانع موجدار و نحوه قرارگیری آنها در آب شیرین‌کن بیان شده است. تمامی حل ها برای حالت های مختلف فقط برای نمونه ۲ انجام شده است و نتایج میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت با نمونه ۲ حالت سنتی در شکل ۹ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت در آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موج دار افزایش پیدا کرده است به طوری‌که در حالت ۹ (حالت ماکزیمم) موانع با تعداد ۵ قله و دامنه ۰/۰۷۵ متر در سمت راست و تعداد ۲ قله با دامنه ۰/۰۱ متر در سمت چپ میزان تولید آب شیرین از ۰/۴۵۹ به ۰/۶۰۱۳ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت رسیده است و همچنین عدد ناسلت متوسط نیز از ۲۹/۱۸ به ۳۸/۳۲۵ افزایش پیدا کرده است. پس در نتیجه عملکرد آب شیرین‌کن با موانع موجدار حدود ۳۱/۳۴٪ بهبود پیدا کرده است.



شکل ۱۰) تابع جریان حالت‌های مختلف آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موجدار



شکل ۱۱) کانتور غلظت حالت‌های مختاف آب شیرین‌کن خورشیدی با موانع موجدار

با توجه به شکل ۹ ملاحظه می‌شود افزایش تعداد قله‌ها به ۶ و کاهش تعداد قله‌ها به ۴ همچنین افزایش و کاهش دامنه از ۰/۰۷۵ مقدار تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت را نسبت به حالت ۹ کمتر کرده است. برای بررسی دقیق‌تر تاثیر موانع موجدار بر روی آب شیرین کن، تابع جریان و کانتور غلظت به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای تمامی حالات رسم شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می گردد قراردادن موانع موجدار بر روی دیواره های آب شیرین‌کن تغییری در شکل گردابه‌های اصلی ایجاد نکرده است و الگوی جریان هوای مرطوب در داخل دستگاه تقریبا مشابه حالت سنتی می‌باشد با این تفاوت که در بعضی از حالت‌ها در پایین دستگاه و نزدیک دیواره‌های جانبی گردابه‌های کوچکی ایجاد کرده است اما ملاحظه می‌گردد که قدرت هر دو گردابه اصلی نسبت به حالت سنتی افزایش داشته است. با افزایش قدرت گردابه ها نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی و تبخیر سطحی از آب موجود در کف دستگاه افزایش یافته است در نتیجه میزان تولید آب شیرین نیز افزایش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

در کار حاضر به بررسی عددی آب شیرین‌کن خورشیدی تک کابینه یک سطح شیب‌دار با قرار دادن موانع به شکل‌های مربعی، مثلثی وموج‌دار بر روی دیواره‌های جانبی آب شیرین‌کن پرداخته شد. معادلات اساسی حاکم به روش حجم محدود حل شد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل عددی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) بررسی عددی کار حاضر با نتایج تجربی و تحلیلی در توافق مناسبی بود.

۲) در طول ساعات مختلف روز با توجه به تغییر دمای دیواره بالا و پایین، میزان آب شیرین تولیدی و عدد ناسلت تغییر می‌کنند. اختلاف دما و مقدار مطلق دمای دیواره بالا و پایین بر میزان تولید آب شیرین تاثیرگذار است.

۳) الگوی جریان هوای مرطوب درون آب شیرین‌کن سنتی از دو گردابه بزرگ تشکیل شده است که در خلاف جهت هم می‌چرخند و عامل ایجاد تبخیر سطحی می‌باشند.

٤) قراردادن موانع مستطیلی در ۱۱ حالت ذکر شده در داخل آب شیرین کن باعث کاهش قدرت گردابه های اصلی در داخل آب شیرین‌کن شد و میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت را در هر ۱۱ حالت کاهش داد.

۵) قراردادن موانع مثلثی در داخل آب شیرین‌کن نیز باعث کاهش قدرت گردابه‌های اصلی آب شیرین‌کن شد و بازده آب شیرین‌کن نیز نسبت به حالت سنتی کاهش یافت.

۶) قرار دادن موانع موج‌دار در داخل آب شیرین‌کن باعث تقویت قدرت گردابه های اصلی شد، که این امر موجب افزایش تولید آب شیرین و عدد ناسلت شد، به طوری‌که در بهترین حالت که حالت ۹ بوده میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت را به ترتیب از ۰/۴۵۹ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت و ۲۹/۱۸ به ۰/۶۰۱۳ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت و ۳۸/۳۲۵ رسانده است.

۷) در حالت کلی در کار حاضر عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی تک شیب‌دار حدود ۳۱/۳۴٪ بهبود پیدا کرده است.

نتایج کار حاضر نشان می‌دهد که موج‌دار کردن دیواره های جانبی آب شیرین‌کن خورشیدی تک کابینه یک سطح شیب‌دار باعث افزایش انتقال حرارت در داخل آن می‌شود از این رو بازده آب شیرین‌کن خورشیدی بهبود می‌یابد. در کارهای آینده می‌توان به بررسی تاثیر موج‌دار کردن دیواره‌های بالا و پایین بر عملکرد آب شیرین‌کن خورشیدی اشاره کرد.

فهرست علائم

A_s	مساحت سطح آب شیرین‌کن (m^2)
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
Cv	میزان غلظت بخار در هوا
Cp	گرما ویژه ($KJ\ kg^{-1}K^{-1}$)
$C_{v\|w}$	میزان غلظت دیواره پایین
$C_{v\|g}$	میزان غلظت بر روی سطح شیشه ای
D_{AB}	ضریب پخش بخار ($m^2\ s^{-1}$)
H_L	ارتفاع دیواره سمت چپ آب شیرین کن (m)
H_r	ارتفاع دیواره سمت راست آب شیرین‌کن (m)
h_c	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب و پوشش شیشه‌ای ($W\ m^{-2}K^{-1}$)
h_{ev}	ضریب انتقال حرارت تبخیر ($W\ m^{-2}K^{-1}$)
h_{fg}	گرمای نهان بخار آب ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
H	ارتفاع آب شیرین‌کن (m)
L	طول آب شیرین‌کن (m)
$\dot{m}$	میزان آب تولیدی ($kg\ s^{-1}$)
M	وزن مولکولی ($kg\ mol^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت
u	مولفه x سرعت ($m\ s^{-1}$)
v	مولفه y سرعت ($m\ s^{-1}$)
P_w	فشار جزئی بخار دردمای آب (Pa)
P_g	فشار جزئی بخار در دمای شیشه (Pa)
$\overline{P}$	فشار ترمودینامیکی (Pa)
P_{LM}	فشار میانگین لگاریمتی (Pa)
Q	انتقال حرارت (J)
Ra	عدد بی بعد رایلی
RSME	جذر میانگین مربعات خطا
T_i	دمای میانگین (K)
T_w	دمای آب (K)
T_g	دمای شیشه (K)
ΔT	اختلاف دما آب و شیشه (K)

علایم یونانی

α	ضریب پخش دمایی هوا ($m^2\ s^{-1}$)
β_c	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
β^*	ضریب انبساط مخصوص ($kg^{-1}m^{-3}$)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ν	ویسکوزیته سینماتیکی هوا ($m^2\ s^{-1}$)
ω	نسبت رطوبت
ψ	رطوبت نسبی

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

1- Edalatpour M, Kianifar A, Ghiami S. Effect of blade installation on heat transfer and fluid flow within a single slope solar still. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2015 Aug 1;66:63-70.
2- Rahmani A, Boutriaa A. Numerical and experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser. international journal of hydrogen energy. 2017 Nov 30;42(48):29047-55.
3- Hameed HG, Diabil HA, Al-Moussawi MA. A numerical investigation of the enhancement of single-slope single-basin solar still productivity. Energy Reports. 2023 Dec 1;9:484-500.
4- Esfe MH, Toghraie D. Numerical investigation of wind velocity effects on evaporation rate of passive single-slope solar stills in Khuzestan province in Iran. Alexandria Engineering Journal. 2023 Jan 1;62:145-56.
5- Serradj DB, Anderson TN, Nates RJ. The use of passive baffles to increase the yield of a single slope solar still. Solar Energy. 2021 Sep 15;226:297-308.
6- Karthick M, Gnanaraj SJ, Appadurai M, Jeshurun SB. Productivity enhancement of a single slope solar still with energy storage medium. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;60:889-93.
7- Panchal H, Mevada D, Sadasivuni KK, Essa FA, Shanmugan S, Khalid M. Experimental and water quality analysis of solar stills with vertical and inclined fins. Groundwater for Sustainable Development. 2020 Oct 1;11:100410.
8- Jani HK, Modi KV. Experimental performance evaluation of single basin dual slope solar still with circular and square cross-sectional hollow fins. Solar Energy. 2019 Feb 1;179:186-94.
9- Rabhi K, Nciri R, Nasri F, Ali C, Bacha HB. Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. Desalination. 2017 Aug 15;416:86-93.
10- Khare VR, Singh AP, Kumar H, Khatri R. Modelling and performance enhancement of single slope solar still using CFD. Energy Procedia. 2017 Mar 1;109:447-55.
11- Akpinar EK, Koçyiğit F. Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. Applied energy. 2010 Nov 1;87(11):3438-50.
12- Abdallah S, Badran O, Abu-Khader MM. Performance evaluation of a modified design of a single slope solar still. Desalination. 2008 Jan 25;219(1-3):222-30.
13- Dalal A, Das MK. Natural convection in a cavity with a wavy wall heated from below and uniformly cooled from the top and both sides.
14- Shawaqfeh AT, Farid MM. New development in the theory of heat and mass transfer in solar stills. Solar energy. 1995 Dec 1;55(6):527-35.
15- Rahbar N, Esfahani JA. Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis. Energy. 2013 Jan 1;49:289-97.
16- Dunkle RV. Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. InProc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961 1961 (Vol. 5, p. 895).
17- Sun H, Lauriat G, Nicolas X. Natural convection and wall condensation or evaporation in humid air-filled cavities subjected to wall temperature variations. International Journal of Thermal Sciences. 2011 May 1;50(5):663-79.