



# 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.<sup>1\*</sup>,  
Azizpour M.<sup>2</sup>,  
Amin Harki Kay S.<sup>2</sup>,  
Mansouri H.<sup>2</sup>

### 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.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Urmia university of technology, Urmia, Iran.

<sup>2</sup> 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 ...

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

صابر یکانی مطلق<sup>۱\*</sup>، محمد عزیزپور<sup>۲</sup>، سیامک امین هرکی کای<sup>۲</sup>، حامی منصور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

کمبرود آب آشامیدنی مشکلات متعددی را برای جامعه بشری ایجاد کرده است. از این رو 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 دیواره‌های 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 ۳۱/۳۴٪ و ۳۱٪ نسبت به حالت سنتی افزایش پیدا کرده است.

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

\*نویسنده مسئول: syekani@uut.ac.ir

### ۱- مقدمه

اگرچه حدود ۷۱٪ از سطح کره زمین را آب پوشانده است اما تنها 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

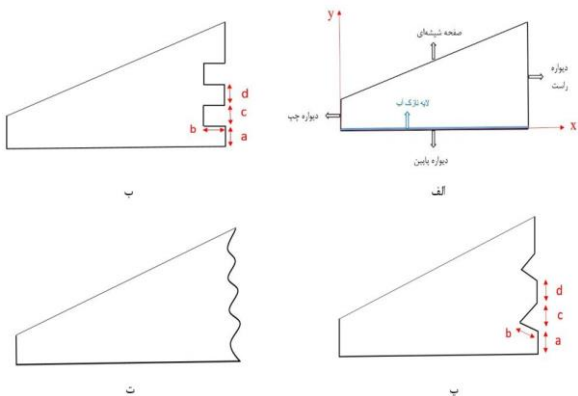
فرایند تبخیر نمک و سایر املاح معدنی در کف دستگاه باقی می‌ماند و بخار خالص آب به سمت بالا حرکت می‌کند و با برخورد به سطح شیشه‌ای تقطیر شده و در ظرفی جمع‌آوری می‌گردد. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بدلیل استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید هیچ‌گونه آلودگی زیست محیطی ایجاد نمی‌کنند و همچنین از نظر اقتصادی نیز نسبت 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 نسبتاً پایین آنها در تولید آب شیرین است به طوری که 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 ۲۰٪ افزایش داد. در سال ۲۰۲۱ کارثیک و همکاران [6] به بررسی تجربی بهبود میزان تولید آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی تک شیب‌دار با قرار دادن سنگ‌های در کف آب شیرین‌کن پرداختند. سنگ‌ها در طول روز گرمای حاصل از تابش نور خورشید را در خود ذخیره کرده و در طول شب گرما را آزاد می‌کند و علاوه بر این الگوی جریان سیال

آزاد در داخل حفره (Cavity) که دیواره راست آن به صورت موج دار 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 پرها در داخل آب شیرین کن عملکرد آن را بهبود بخشیده است. با این وجود تحقیق کمتری بر روی قراردادن موانع بر روی دیواره‌های جانبی آب شیرین کن 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 موج دار با تعداد و اندازه‌های متفاوت بر روی دیواره سمت چپ و راست آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار بررسی می‌شود. هدف از قرار دادن موانع ایجاد تغییر در الگوی جریان هوای مرطوب داخل آب شیرین کن است. در کار حاضر تاثیر نوع شکل موانع، تعداد موانع، اندازه موانع و نحوه قرارگیری آنها، در الگوی جریان، میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت بررسی خواهد شد.

## ۲- هندسه مسئله

در مطالعه حاضر از آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار که ابعاد هندسه آن در کار عددی مرجع [14] ذکر شده به طوری که ارتفاع دیواره سمت راست  $H_R = 0.47$ ، ارتفاع دیواره سمت چپ  $H_L = 0.1$  و طول دیواره پایین  $L = 0.98$  متر است به عنوان هندسه اولیه مسئله استفاده شده است. در شکل ۱- الف نمایی از آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار سنتی آورده شده است.



**شکل ۱) الف- شکل نمونه ای از آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار سنتی ب- شکل نمونه ای از آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار همراه با موانع مستطیلی پ- شکل نمونه ای از آب شیرین کن خورشیدی همراه با موانع مثلثی ت- شکل نمونه ای از آب شیرین کن خورشیدی همراه با موانع موج دار**

را در پایین آب شیرین کن تغییر می‌دهد. نتیجه حاصل از کار آنها نشان داد میزان تولید آب شیرین حدود  $18/6\%$  افزایش یافت. در سال ۲۰۲۰ پانچال و همکاران [7] بررسی تجربی با موضوع قرار دادن پره‌های عمودی و شیب دار با زاویه  $30^\circ$  درجه نسبت به افق بر روی دیواره پایین آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار انجام دادند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که قرار دادن پره‌های عمودی و شیب دار در کف آب شیرین کن بازدهی آب شیرین کن را نسبت به حالت سنتی حدود  $24/19\%$  و  $26/77\%$  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 شیرین کن در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از کار آنها بیان کرد که بیشترین بازده مربوط به عمق ۱۰ میلی‌متر بوده به طوری که میزان تولید روزانه آب شیرین، آب شیرین کن خورشیدی در عمق ۱۰ میلی‌متر با موانع مربعی و دایروی به ترتیب  $0.967$  و  $1.491$  کیلوگرم بر متر مربع بود. در سال ۲۰۱۷ راهبی و همکاران [9] به بررسی تجربی نحوه عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار با قراردادن پره‌های میخی شکل بر روی دیواره پایین آب شیرین کن خورشیدی پرداختند. نتایج نشان داد که در شرایط کامل یکسان میزان تولید آب شیرین از مقدار  $2/471$  لیتر بر متر مربع به حدود  $2/83$  لیتر بر متر مربع رسید. در سال ۲۰۱۷ وابی‌هاو و همکاران [10] به بررسی عددی آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار با نرم‌افزار آنسیس فلونت و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. نتایج حاصل از کار آنها تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشت. علاوه بر این به بررسی تاثیر عمق آب در کف آب شیرین کن بر میزان تولید آب شیرین پرداختند، نتایج حاصل از کار آنها نشان داد عمق کم آب در کف آب شیرین کن بر بهبود عملکرد آب شیرین کن موثر است. در سال ۲۰۱۰ آکپینار و همکاران [11] به بررسی آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار با گرمکن هوایی همراه با سه نوع مانع مختلف که بر روی دیواره پایین آب شیرین کن تعبیه شدند، پرداختند. دبی جریان هوای گرم ورودی به آب شیرین کن در حدود  $0.0074$  و  $0.0052$  کیلوگرم بر ثانیه بود. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد بیشترین بازدهی آب شیرین کن مربوط به هنگامی است که از جریان هوای گرم با موانع نوع دوم استفاده شد. در سال ۲۰۰۸ عبدالله و همکاران [12] عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک شیب دار را با پله‌ای کردن دیواره پایین آب شیرین کن و همچنین قراردادن آینه بر روی دیواره‌های داخلی بررسی کردند. آینه‌ها نور خورشید تابیده شده رو منعکس می‌کرد و پله‌ای شدن بستر آب شیرین کن باعث تغییر الگوی جریان آب داخل آب شیرین کن شد. با این تغییرات ایجاد شده عملکرد آب شیرین کن خورشیدی حدود  $38\%$  بهبود یافت. در سال ۲۰۰۶ مناب کومار و همکاران [13] به بررسی انتقال حرارت جابه جایی

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta_t g(T - T_g) + \beta_c g(c - c_g) \quad (5)$$

که در آن  $u, v$  مولفه‌های بردار سرعت در راستای  $x, y$  همچنین  $p$  نشان دهنده میدان فشار و  $T$  بیانگر میدان دما،  $c$  نشان دهنده غلظت و پارامترهای  $\rho, \vartheta, \beta_t, \beta_c$  به ترتیب برابر چگالی، ویسکوزیته سینماتیکی، ضریب انبساط دمایی و حجمی هستند. معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

که در آن  $T$  نشان دهنده میدان دما و  $u, v$  مولفه‌های بردار سرعت در راستای  $x, y$  و  $\alpha$  نشان دهنده ضریب پخش دمایی است. معادله غلظت:

$$u \frac{\partial}{\partial x} (c_v) + v \frac{\partial}{\partial y} (c_v) = D_{AB} \left( \frac{\partial^2 c_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_v}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

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].

$$Nu = \frac{-1}{(T_w - T_g)} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial y} dx \quad (8)$$

$$\dot{m} = \frac{-3600 \times D_{AB} \times \rho}{L} \int_0^L \frac{\partial c}{\partial y} dx \quad (9)$$

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:

$$\dot{q}_{ev} = h_{ev} A_s (T_w - T_g) = \dot{m} L_v \quad (10)$$

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:

$$h_{ev} = 0.016273 \times 0.884 (\Delta T)^{1/3} \times \frac{p_w - p_g}{T_w - T_g} \quad (11)$$

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:

$$Nu = 0.057 \times \left( \frac{\rho^2 g \beta_c H^3 \Delta T}{K \mu} \right)^{1/3} \quad (12)$$

### ۱-۲- 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.

### ۳-۲- 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.

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

$$x = A(1 - \cos(NW\pi y)) \quad (2)$$

$N, A$  به ترتیب نصف دامنه موج، تعداد قله است و  $W$  عدد ثابتی است برای معادله موج (۱) برابر  $4/256$  و برای معادله موج سمت (۲) برابر ۲۰ است.

### ۳- معادلات حاکم

در آب شیرین‌کن خورشیدی با هندسه‌های 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 دیواره‌های بالا و پایین در مقدار ثابت  $T_w$  و  $T_g$  بوده و دیواره‌های 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:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

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

معادلات مومنتم:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

جدول (۱) جدول مشخصات موانع مستطیلی، مثلثی، موج دار

| تعداد موانع   | سمت  | a      | b      | c     | d      | تعداد قله   | نصف دامنه              |
|---------------|------|--------|--------|-------|--------|-------------|------------------------|
| موانع مستطیلی |      |        |        |       |        |             |                        |
| حالت ۱        | راست | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۴۷  | -           | -                      |
| حالت ۲        | راست | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴  | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۴۷  | -           | -                      |
| حالت ۳        | راست | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴  | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۷  | -           | -                      |
| حالت ۴        | راست | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۴۷  | -           | -                      |
| حالت ۵        | راست | ۰/۰۹۴  | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۹۴  | -           | -                      |
| حالت ۶        | راست | ۰/۰۹۴  | ۰/۱۸   | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۹۴  | -           | -                      |
| حالت ۷        | راست | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۰۱   | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۲۳۵ | -           | -                      |
| حالت ۸        | راست | ۰/۰۲۳۵ | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | -      | -           | -                      |
| حالت ۹        | راست | ۰/۲۵۶  | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | -      | -           | -                      |
| حالت ۱۰       | چپ   | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۴۷ | -      | -           | -                      |
| حالت ۱۱       | چپ   | ۰/۰۴۷  | ۰/۱۵   | ۰/۰۴۷ | -      | -           | -                      |
| موانع مثلثی   |      |        |        |       |        |             |                        |
| حالت ۱        | راست | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۴۷  | -           | -                      |
| حالت ۲        | راست | ۰/۰۹۴  | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | ۰/۰۹۴  | -           | -                      |
| حالت ۳        | راست | ۰/۱۸۸  | ۰/۰۴۷  | ۰/۰۹۴ | -      | -           | -                      |
| موانع موج دار |      |        |        |       |        |             |                        |
| 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   | -      | -      | -     | -      | چپ=۲ راست=۵ | چپ=۰/۰۱<br>راست=۰/۰۷۵  |
| حالت ۱۰       | چپ   | -      | -      | -     | -      | چپ=۲ راست=۵ | چپ=۰/۰۲۵<br>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   | ۱۹:۴۲   |
| دما سطح شیشه ای (°C)   | ۴۵/۲۶   | ۵۵/۶۳   | ۴۷/۷۶   | ۲۷/۶۷   |
| دمای دیواره پایین (°C) | ۵۳/۱    | ۶۴/۲    | ۵۶/۳۳   | ۳۲/۹۶   |
| غلظت سطح شیشه ای       | ۰/۰۲۰۸  | ۰/۱۰۶۴  | ۰/۰۷۰۸  | ۰/۰۲۳۱  |
| غلظت دیواره پایین      | ۰/۰۹۳۵  | ۰/۱۶۳۵  | ۰/۱۱۰۳  | ۰/۰۳۱۴  |

روز که مقادیر  $T_g$  و  $T_w$  براساس مرجع [14] داده شده حل شده است. لازم به ذکر است که غلظت بر روی دیواره پایین و سطح شیشه ای بالا با در نظر گرفتن رطوبت نسبی ۱۰۰٪ در دما و فشار جزئی بخار آب در دیواره پایین و سطح شیشه ای محاسبه شده است. جدول ۲ پنج حالت بررسی شده در پنج زمان مختلف از روز را نشان می دهد.

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.

که در آن  $g, \mu, K, p, C_p, H, \beta$  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 شیرین کن عایق گرما و جرم است. اما دما و غلظت در دیواره پایین و سطح شیشه ای بالا به ترتیب با مقادیر  $(C_{v|g}, T_g)$  و  $(C_{v|w}, T_w)$  بیان می شود. این مقادیر با زمان تغییر می کنند، از این رو آب شیرین کن در ۵ زمان مختلف از طول

جدول ۳) مشخصات ترموفیزیکی هوای مرطوب

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

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

|                               | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub>         | A <sub>2</sub>           | A <sub>3</sub>          | A <sub>4</sub>          |
|-------------------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| هوای خشک (رسانای حرارتی)      | -              | $0.965 \times 10^{-4}$ | $-9.96 \times 10^{-9}$   | $-9.31 \times 10^{11}$  | $8.882 \times 10^{-14}$ |
| بخار آب (رسانای حرارتی)       | -              | $0.349 \times 10^{-4}$ | $1.511 \times 10^{-7}$   | $2.576 \times 10^{-10}$ | $2.05 \times 10^{-12}$  |
| بخار آب (گرمای مخصوص بخار آب) | 1877/8         | -0/441                 | $1.568 \times 10^{-3}$   | $-7.286 \times 10^{-7}$ | -                       |
| هوای خشک (لزجت دینامیکی)      | -              | $7.724 \times 10^{-8}$ | $-5.952 \times 10^{-11}$ | $2.713 \times 10^{-14}$ | -                       |
| بخار آب (لزجت دینامیکی)       | -              | $5.751 \times 10^{-8}$ | $-1.736 \times 10^{-10}$ | $3.901 \times 10^{-13}$ | $-2.69 \times 10^{-16}$ |

نظر گرفته شده‌اند ( $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ ). 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 ( $\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ ). در نهایت برای پارامتر فشار شرط مرزی گرادیان صفر برای تمامی دیواره‌ها و جداره شیشه‌ای اعمال شده است ( $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$ ).

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 سمت چپ و راست آب شیرین‌کن، عایق حرارتی در

## ۵- تنظیمات عددی، مطالعه شبکه، اعتبار سنجی

### ۱-۱- تنظیمات عددی و مطالعه شبکه

در کار حاضر، حلگر مسئله با زبان ++C توسعه داده شده است. از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و انتقال جرم استفاده شده است. از الگوریتم SIMPLE برای کوپل فشار-سرعت استفاده شده است. به منظور درون یابی ترم های جابه جایی و ترم های نفوذ در معادلات بقا به ترتیب از روش های 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 شبیه سازی مستقل از تعداد شبکه است استقلال از شبکه برای هر سه نوع مانع انجام شده است. از آنجایی که آب شیرین کن خورشیدی با قرارگیری موانع موج دار حالت بحرانی است، نتایج حالت ۱ آب شیرین کن خورشیدی با موانع موج دار با تعداد مش های متفاوت در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج مشاهده می گردد عدد ناسلت و میزان تولید آب شیرین با تعداد مش ۱۰۰۰۰ تقریباً ثابت مانده لذا این تعداد شبکه مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۵- اعتبار سنجی

برای اطمینان از صحت نتایج عددی حاصل، میزان تولید آب شیرین و عدد ناسلت آب شیرین کن خورشیدی سنتی کار حاضر با سایر تحقیقات مقایسه شده است. میزان تولید آب شیرین کار حاضر با نتایج تجربی شفق<sup>[14]</sup> و کار تحلیلی دانکل<sup>[16]</sup> 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 شیرین کن کار حاضر با کار تحلیلی دانکل<sup>[16]</sup> 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 نسبتاً خوب کار حاضر با کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی است.

### ۶- نتایج

در این بخش به ترتیب به بررسی نحوه عملکرد آب شیرین کن خورشیدی سنتی، آب شیرین کن خورشیدی با موانع مستطیلی، آب شیرین کن خورشیدی با موانع مثلثی و آب شیرین کن خورشیدی با موانع موج دار پرداخته خواهد شد.

### ۱-۶- بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی سنتی

در ابتدا میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت برای آب شیرین کن 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 می دهد که بیشترین میزان تولید آب شیرین که حدود ۰/۴۵۹ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت است در نمونه ۲ و در حوالی ساعت ۱۴ رخ می دهد با گذشت زمان و کاهش دما، میزان تولید آب شیرین کم شده به طوری که کمترین مقدار تولید آب شیرین که حدود ۰/۰۵۳۷ کیلوگرم بر متر مربع در ساعت است در نمونه ۵ و حوالی ساعت ۱۹ رخ می دهد. نرخ انتقال حرارت نیز در حوالی ساعات ۱۴ الی ۱۵ بیشترین مقدار خود را داشته و در حوالی ساعت ۱۹ به کمترین مقدار خود می رسد. تابع جریان برای تمامی نمونه ها در شکل ۲ ترسیم شده اند. همان طور که در شکل ۲ ملاحظه می گردد الگوی جریان در پنج نمونه تقریباً مشابه هم می باشد و تفاوت اصلی هر کدام از نمونه ها 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 می کند، حرکت این چنین جریان بخار آب در داخل آب شیرین کن باعث تشکیل دو گردابه بزرگ و غیر هم جهت می شود که گردابه سمت راست به صورت ساعتگرد و گردابه سمت چپ به صورت پادساعتگرد می چرخند، و با چرخش این گردابه ها بر بالای آب موجود در کف دستگاه جریانی ایجاد می شود که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و افزایش تبخیر سطحی و به تبع آن افزایش میزان تولید آب شیرین می گردد. با توجه به شکل ۲ مقدار مجموع تابع جریان مثبت و منفی در حالت ۲ از سایر حالت ها بیشتر بوده پس میزان تولید آب شیرین در این حالت مقدار بیشینه را دارد. علاوه بر این در بعضی از نمونه ها گردابه های کوچکی در نزدیکی دیواره های جانبی ایجاد می شوند که باعث اتلاف انرژی جریان می شوند. همچنین کانتورهای دما و غلظت در شکل ۳ ترسیم شده است که با توجه به این شکل ها می توان لایه های مرزی دمایی و جرمی را مشاهده کرد که بر روی دیواره پایین آب شیرین کن ایجاد شده است و تقریباً در مرکز آب شیرین کن 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

### ۲-۶- بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی با موانع مستطیلی

مشاهده شد که حداکثر میزان تولید آب شیرین در آب شیرین کن خورشیدی در نمونه ۲ اتفاق می افتد 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 شیرین کن، سعی در بهبود عملکرد آب شیرین کن خورشیدی شده است.

جدول ۵) نتایج استقلال از شبکه حالت ۱ آب شیرین کن خورشیدی با مانع موج دار

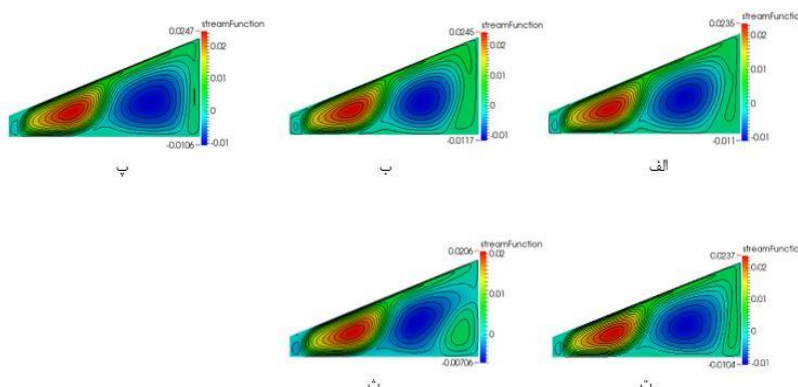
| تعداد مش | میزان تولید آب شیرین $(\frac{kg}{m^2.h})$ | عدد ناسلت |
|----------|---|-----------|
| ۷۰×۷۰    | ۰/۵۰۸۶                                    | ۳۲/۴۸     |
| ۸۰×۸۰    | ۰/۴۹۳۶                                    | ۳۱/۵۱     |
| ۹۰×۹۰    | ۰/۴۸۷۲                                    | ۳۱/۱۲  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

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 |

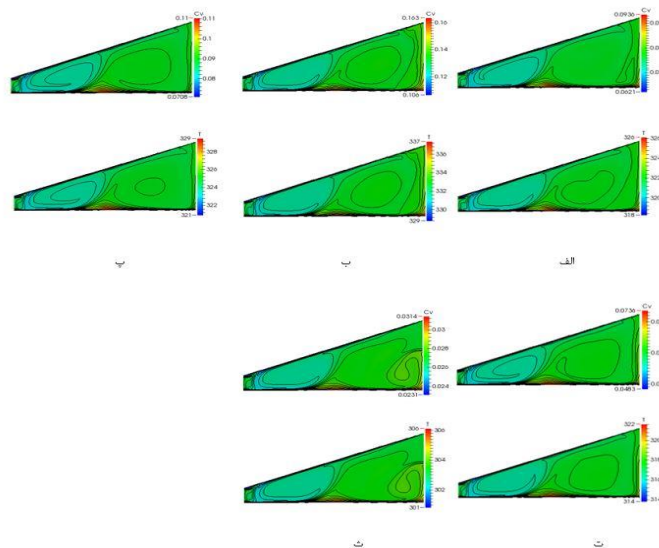


شکل ۲) الف-تابع جریان نمونه ۱ ب-تابع جریان نمونه ۲ پ-تابع جریان نمونه ۳ ت-تابع جریان نمونه ۴  
ث-تابع جریان نمونه ۵

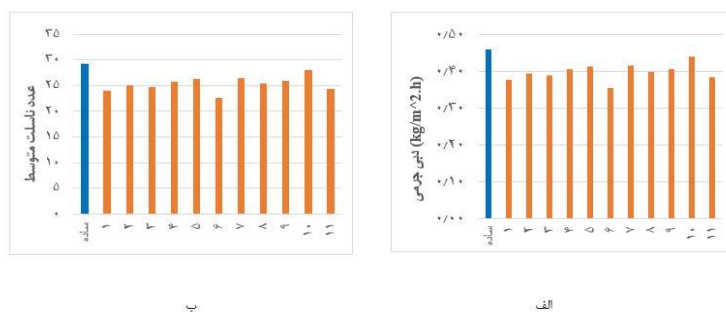
شده‌اند. باتوجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد با قرار دادن موانع مستطیلی در سمت راست آب شیرین کن، اندازه گردابه سمت راست کوچک‌تر شده و قدرت آن هم کاهش یافته است ولی بر گردابه سمت چپ تاثیر کمی گذاشته است. در بعضی از حالت ها گردابه سمت راست به دو گردابه ضعیف‌تر تقسیم شده است و همچنین گردابه‌های گوشه نیز در نزدیکی 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 شیرین کن دارد. علاوه براین با قرار دادن موانع مستطیلی با ابعاد حالت ۹ در سمت چپ آب شیرین کن الگوی جریان هوای مرطوب داخل دستگاه در مقایسه با حالت های دیگر تغییر کرده است.

هدف از قرار دادن موانع مستطیلی در داخل آب شیرین کن تغییر در الگوی جریان هوای مرطوب داخل آب شیرین کن 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 شیرین کن 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 شیرین کن، تابع جریان و کانتور غلظت به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ برای حالات مختلف رسم

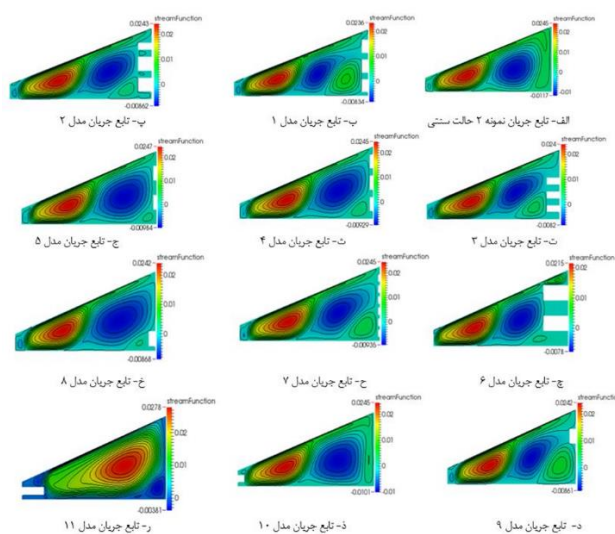




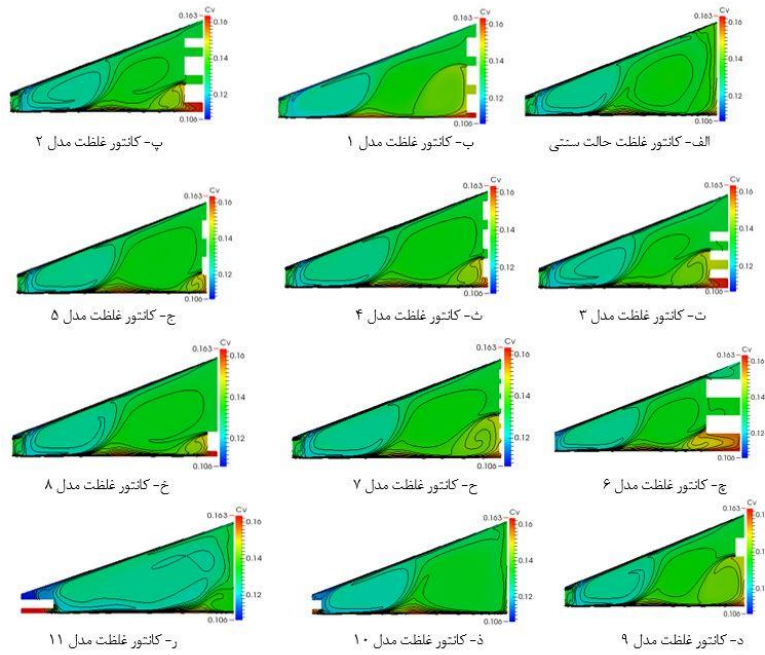
شکل ۳ الف- کانتور غلظت و دما نمونه ۱ ب- کانتور غلظت و دما نمونه ۲ پ- کانتور غلظت و دما نمونه ۳ ت- کانتور غلظت و دما نمونه ۴ ث- کانتور غلظت و دما نمونه ۵



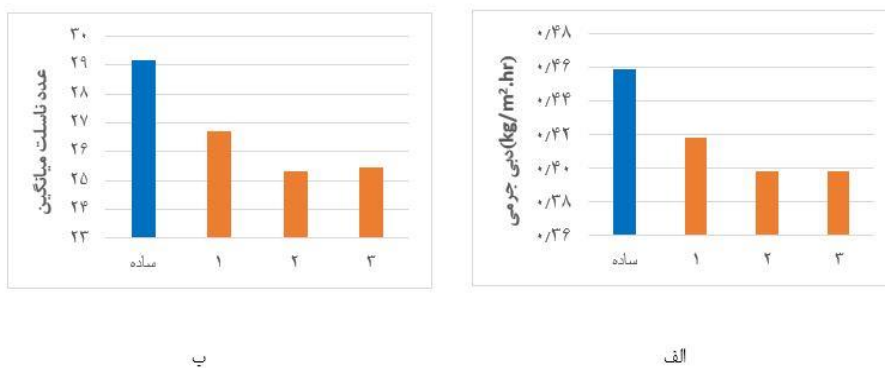
شکل ۴ الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین کن سنتی با آب شیرین کن با موانع مستطیلی ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین کن خورشیدی سنتی با آب شیرین کن با موانع مستطیلی



شکل ۵ تابع جریان حالت های مختلف آب شیرین کن خورشیدی با موانع مستطیلی



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



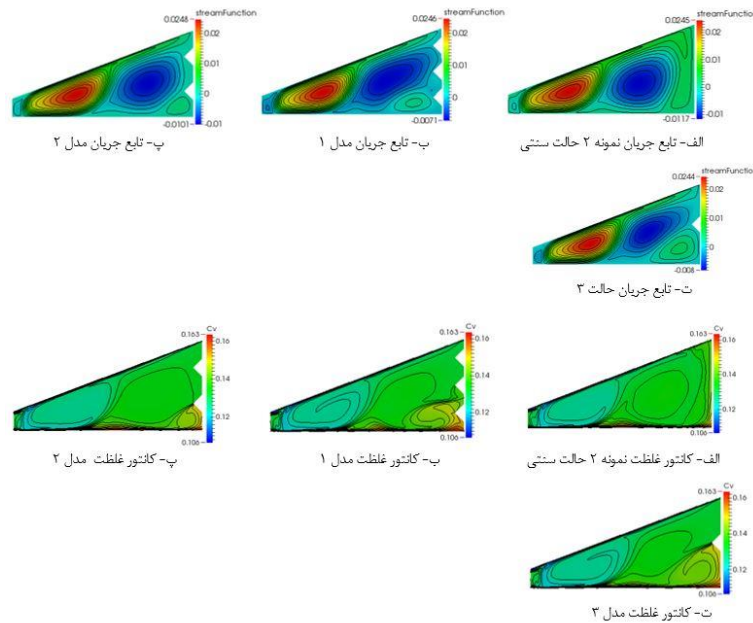
شکل ۷) الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین‌کن سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مثلثی ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین‌کن خورشیدی سنتی با آب شیرین‌کن با موانع مثلثی

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 حل‌ها مشاهده می‌گردد که میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت در تمامی حالات کاهش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر 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 موانع مثلثی به وجود آمده است.

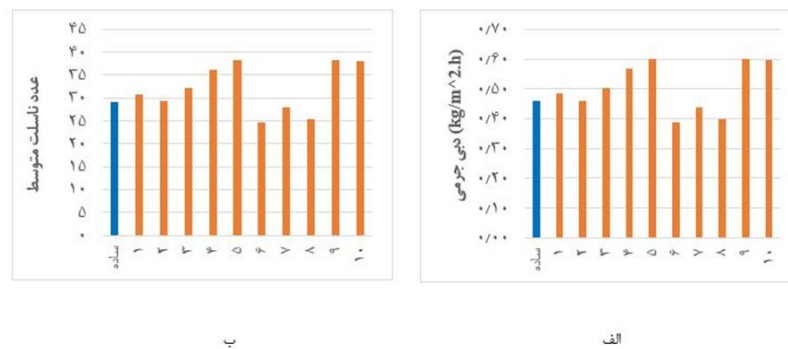
در حالت مذکور موانع مستطیلی گردابه‌های چپ و راست را با هم ادغام کرده و یک گردابه بزرگتر ایجاد کرده است اما چون تعداد گردابه‌ها کاهش یافته و از طرف دیگر قدرت گردابه ایجاد شده نیز به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش نیافته است در این حالت نیز بازده آب شیرین‌کن نسبت به حالت سنتی کاهش یافته است.

### ۳-۶- 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 شیرین‌کن 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 قرارگیری آنها در داخل آب شیرین‌کن ذکر شده است. تمامی حل‌های مختلف فقط برای نمونه ۲



شکل ۸) تابع جریان و کانتور غلظت حالت های مختلف آب شیرین کن خورشیدی با موانع مثلثی



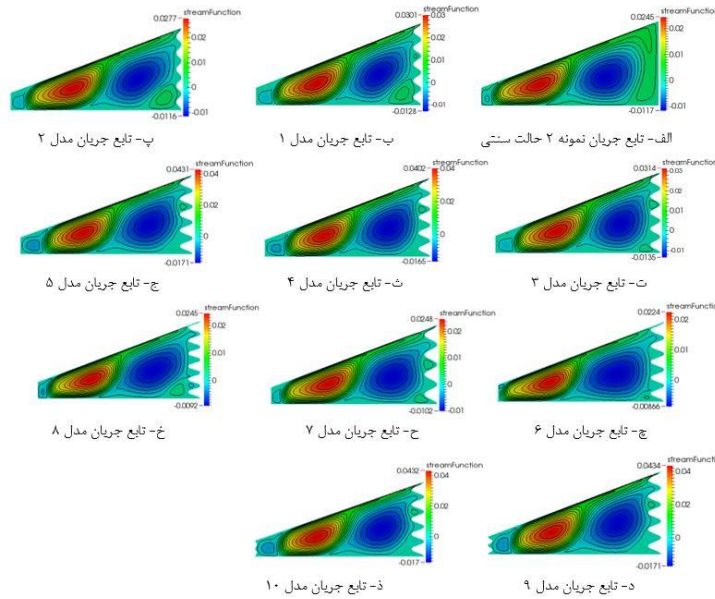
شکل ۹) الف- نمودار مقایسه میزان تولید آب شیرین آب شیرین کن سنتی با آب شیرین کن با موانع موج دار ب- نمودار مقایسه عدد ناسلت آب شیرین کن خورشیدی سنتی با آب شیرین کن با موانع موج دار

موانع موج دار و نحوه قرارگیری آنها در آب شیرین کن 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 می دهد که میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت در آب شیرین کن خورشیدی با موانع موج دار افزایش پیدا کرده است به طوری که در حالت ۹ (حالت ماکزیمم) موانع با تعداد ۵ قله و دامنه  $0.075$  متر در سمت راست و تعداد ۲ قله با دامنه  $0.01$  متر در سمت چپ میزان تولید آب شیرین از  $0.459$  به  $0.613$  کیلوگرم بر متر مربع در ساعت رسیده است و همچنین عدد ناسلت متوسط نیز از  $29/18$  به  $38/325$  افزایش پیدا کرده است. پس در نتیجه عملکرد آب شیرین کن با موانع موج دار حدود  $31/34\%$  بهبود پیدا کرده است.

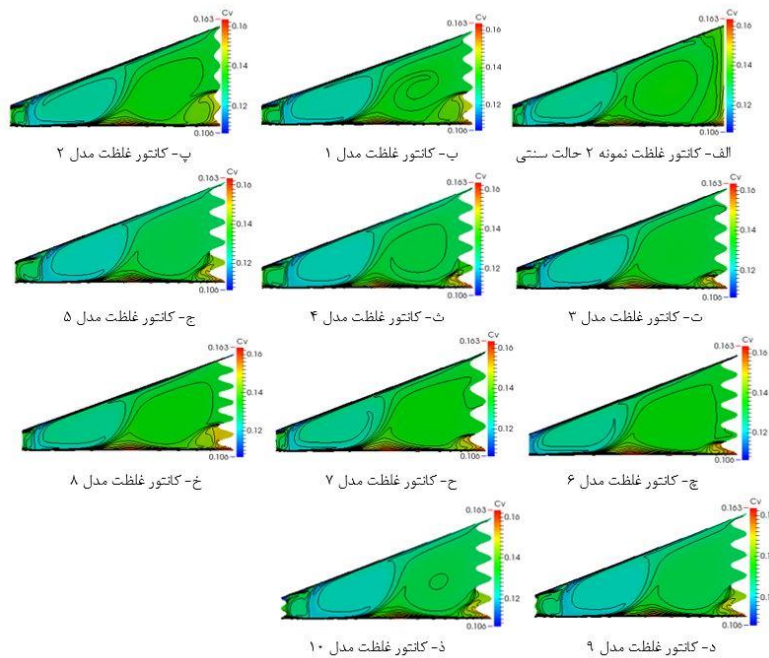
با این تغییرات ایجاد شده قدرت گردابه های اصلی کاهش یافته و در نتیجه نرخ انتقال حرارت و به تبع آن میزان تولید آب شیرین کاهش یافته است. در این بخش اندازه موانع ثابت بوده و فقط تعداد آنها تغییر کرده است که از شکل ۷ مشاهده می گردد که تعداد موانع کمتر اثر نامطلوب تری بر میزان تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت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

**۴-۶- بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی با موانع موج دار**  
مشاهده گردید که قرار دادن موانع مستطیلی و مثلثی در آب شیرین کن خورشیدی اثری نامطلوب در تولید آب شیرین و نرخ انتقال حرارت دارد.

در این بخش از موانع موج دار در سمت راست و چپ آب شیرین کن استفاده شده است. هدف از قراردادن موانع موج دار نیز به مشابه موانع مستطیلی و مثلثی تقویت قدرت گردابه ها و یا ایجاد گردابه های جدید می باشد. در جدول ۱- پ مشخصات



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



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

تقریباً 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 گردابه‌ها 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.

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 شیرین‌کن، تابع جریان و کانتور غلظت به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای تمامی حالات رسم شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد قراردادن موانع موج‌دار بر روی دیواره‌های آب شیرین‌کن تغییری در شکل گردابه‌های اصلی ایجاد نکرده است و الگوی جریان هوای مرطوب در داخل دستگاه

بررسی تاثیر موج‌دار کردن دیواره‌های بالا و پایین بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی اشاره کرد.

### فهرست علائم

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

### علائم یونانی

|  |           |
|--|-----------|
| ضریب پخش دمایی هوا ( $m^2 s^{-1}$ )      | $\alpha$  |
| ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )            | $\beta_c$ |
| ضریب انبساط مخصوص ( $kg^{-1}m^3$ )       | $\beta^*$ |
| چگالی ( $kg/m^3$ )                       | $\rho$    |
| ویسکوزیته سینماتیکی هوا ( $m^2 s^{-1}$ ) | $\nu$     |
| نسبت رطوبت                               | $\omega$  |
| رطوبت نسبی                               | $\psi$    |

### ۷- نتیجه‌گیری

در کار حاضر به بررسی عددی آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌کابینه یک سطح شیب‌دار با قرار دادن موانع به شکل‌های مربعی، مثلثی و موج‌دار بر روی دیواره‌های جانبی آب‌شیرین‌کن 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 آب‌شیرین‌تولیدی و عدد ناسلت تغییر می‌کنند. اختلاف دما و مقدار مطلق دمای دیواره بالا و پایین بر میزان تولید آب‌شیرین‌تائیرگذار است.

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

(۴) قراردادن موانع مستطیلی در ۱۱ حالت ذکر شده در داخل آب‌شیرین‌کن باعث کاهش قدرت گردابه‌های اصلی در داخل آب‌شیرین‌کن شد و میزان تولید آب‌شیرین و نرخ انتقال حرارت را در هر ۱۱ حالت کاهش داد.

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

(۶) قرار دادن موانع موج‌دار در داخل آب‌شیرین‌کن باعث تقویت قدرت گردابه‌های اصلی شد، که این امر موجب افزایش تولید آب‌شیرین و عدد ناسلت شد، به طوری‌که در بهترین حالت که حالت ۹ بوده میزان تولید آب‌شیرین 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 آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌شیب‌دار حدود ۳۱/۳۴٪ بهبود پیدا کرده است.

نتایج کار حاضر نشان می‌دهد که موج‌دار کردن دیواره‌های جانبی آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌کابینه یک سطح شیب‌دار باعث افزایش انتقال حرارت در داخل آن می‌شود از این رو بازده آب‌شیرین‌کن خورشیدی بهبود می‌یابد. در کارهای آینده می‌توان به

- 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. In Proc. 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.

**تأییدیه 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 منافی 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- Akpınar 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.