



## مدل سازی آب شیرین کن حوضچه‌ای خورشیدی و بررسی ضریب انتقال حرارت در آن

رهبر رحیمی - دانشیار گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان  
نرجس ستوده - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان  
ابوالحسن عامری - استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

E-mail: [rahimi@hamoon.usb.ac.ir](mailto:rahimi@hamoon.usb.ac.ir)

**چکیده:** استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، بلکه در کاهش آلاینده‌ها و حفظ محیط زیست نیز مؤثر است. بحران کم‌آبی یکی از مشکلات عمده در جوامع بشری می‌باشد. استفاده از انرژی خورشیدی هم‌اینک در تولید آب شیرین در دستگاه‌های تقطیر خورشیدی مرسوم شده است. اما جهت افزایش راندمان دستگاه‌های خورشیدی نیاز به مدلسازی جامع و همچنین پارامترهای انتقال از جمله ضریب انتقال حرارت می‌باشد. به این جهت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدلسازی دو فازی سه‌بعدی در فرایند تبخیر و چگالش آب شیرین‌کن‌ها بررسی شده است. مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار CFX 11 انجام گرفته‌است. نتایج این مدل‌سازی با داده‌های تجربی آب-شیرین‌کن حوضچه‌ای مقایسه شده است که انطباق خوبی دارند. همچنین ضریب انتقال حرارت در این مدل بررسی شده‌است. به این ترتیب توانمندی دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی آب شیرین‌کن‌ها تأیید می‌گردد.

**واژه های کلیدی:** آب‌شیرین‌کن خورشیدی، دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب انتقال حرارت، تبخیر و چگالش.

## Modeling of a Basin Type Solar Still and Investigation of its Heat Transfer Coefficient

R. Rahimi, Asst. Prof., Chem. Eng. Dept., Shahid Nikbakht Eng. Faculty, Sis. and Bal. University.  
N. Setoodeh, Ms. Student, Chem. Eng. Dept., Shahid Nikbakht Eng. Faculty, Sis. and Bal. University.  
A. Ameri, Ass. Prof., Chem. Eng. Dept., Shahid Nikbakht Eng. Faculty, Sis. and Bal. University.

**Abstract:** Usage of renewable energies such as solar energy is not only commodious as point of economic, it also is effective in reduction of pollutants and environment preservation. Lack of water is one of the most important problems in human society. Nowadays, use of solar energy has become a common way for production of fresh water in solar distillation equipments. However for increasing efficiency of these equipments, we need a comprehensive modeling and transport parameters such as heat transfer coefficient. Modeling is done with ANSYS CFX 11 software. Results are compared with experimental data of basin solar still and are in good agreement. Also heat transfer coefficient is investigated. So CFD is a powerful tool in design of solar still.

**Keywords:** Solar still, CFD, Heat transfer coefficient, Evaporation and condensation.

۱- مقدمه

امروزه مواجه شدن با بحران کم آبی یکی از مشکلات عمده در جوامع بشری می‌باشد. در هر ۲۰ یا ۳۰ سال، جمعیت جهان رو به افزایش می‌گذارد، در صورتی که با کاهش منابع آب مواجه هستیم. تحقیقات نشان داده که حدود ۷۹ درصد آب‌های در دسترس روی زمین نمکی هستند، حدود یک درصد آب‌ها سالم و قابل شرب می‌باشد [۳]. در تقطیر خورشیدی از آب دریاها و آب‌های شور مزه به منظور تهیه آب تازه استفاده می‌شود. امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدشدنی (باد، آب، انرژی خورشیدی و ...) با توجه به گران شدن سوخت‌های فسیلی و ایجاد آلودگی در محیط زیست اهمیت زیادی پیدا کرده است. استفاده از انرژی خورشیدی به موازات افزایش رشد آماری و صنعتی و فراوانی این منبع انرژی و پتانسیل بالای انرژی مورد توجه قرار گرفته است [۳]. خورشید یکی از منابع مهم انرژی است زیرا فناوری پرهزینه و پیشرفته نیاز نداشته و می‌توان به عنوان یک منبع مفید به کار گرفته شود. خوشبختانه به علت شدت تابش خورشید در بیشتر مناطق استفاده از این انرژی می‌تواند باعث صرفه‌جویی در مصرف نفت و گاز، آلوده نشدن هوا و محیط زیست، رشد و توسعه اقتصاد و ذخیره شدن سوخت‌های فسیلی برای آیندگان شود.

استفاده از انرژی خورشیدی از سومین قرن قبل از میلاد مسیح توسط ارشمیدس و ۱۰۰ سال بعد از میلاد مسیح توسط هرن الکساندریا (Heron of Alexandria) آغاز شد. توسط سالمن دیگاس (Salamon deguss، سال ۱۶۱۵) و همچنین به وسیله جوزف پریستلی (Joseph priestly، سال ۱۷۷۴) ادامه یافت [۴]. در قرن ۱۹ حیوانی باتیستا دلا پرتا (Giovanni Batista Della Porta) اولین دانشمندی بود که در زمینه تقطیر خورشیدی چندین روش ارائه نمود که مهمترین آن‌ها ساخت یک دستگاه تقطیر خورشیدی بود. سپس یک مهندس

سوئدی به نام کارلوس ویلسون (Carlos Wilson، سال ۱۸۷۲) از انرژی خورشید در تقطیر آب شور استفاده کرد [۵]. شیومن (schuman) یک دستگاه خورشیدی ساخت که به وسیله پمپاژ آب عمل می‌کرد [۶]. بویز (Boys، سال ۱۹۱۳) یک دستگاه تقطیر در نزدیکی مصر ساخت و مورد استفاده قرار داد و سپس تا سال ۱۹۵۰ انرژی خورشیدی به دلیل ارزان بودن و کارایی مناسب سوخت‌های فسیلی، کنار گذاشته شد [۶]. دانشمند بزرگ فرانسوی لاوازیه (۱۹۸۲)، از یک متمرکزکننده خورشیدی برای تقطیر در یک فلاسک استفاده کرد [۷]. یک نمونه ساده و طرح عملی تقطیرکننده‌های خورشیدی نوع تک-حوضچه‌ای یا پلکانی می‌باشد و همچنین نوع فیتله‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت که این کارها توسط تلکس (Telks، سال ۱۹۹۵) انجام شد. روش‌های ذخیره گرما در تقطیر کننده‌ها توسط نابیل حسین (Nabil Hussain، سال ۲۰۰۱) بررسی شد [۸]. رهوان عبدالحی (M.Rdhwan Abdulhaiy، سال ۲۰۰۳) به بررسی ذخیره انرژی با توجه به گرمای نهان در سیستم‌های چندمرحله‌ای پرداخت [۹]. در سال‌های اخیر بیشتر مطالعات بر روی مدل‌سازی و مطالعات تجربی این دستگاه‌ها صورت گرفته است. سایر افراد نیز مطالعاتی روی مدل‌سازی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام داده‌اند که می‌توان اشخاصی از جمله مولا (Mowla) [۱۰]، شواکفه (Shawaqfeh) [۱۱]، ری و یون تویوما (Toyoma Rhee & Yoon) را نام برد. در زمینه ی مدل سازی آب شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، احمد و همکاران توسط نرم افزار FLUENT، مدل دو بعدی برای آب شیرین‌کن خورشیدی سه مرحله ای تحت خلأ ارائه کرد [۲].

بالا بردن راندمان این آب‌شیرین‌کن‌ها به منظور تولید آب تازه بیشتر در طول روز و جبران هزینه‌های موجودامری ضروری می‌باشد. اما از آنجا که هزینه‌ی ساخت آب شیرین‌کن برای

آب شور به شیشه شده که افزایش میزان اختلاف دما موجب افزایش میزان تبخیر می‌گردد. این انتقال درون دستگاه به صورت جابجایی آزاد صورت می‌پذیرد. یکی از بخش‌های مهم در بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر کارکرد دستگاه بررسی انتقال حرارت درونی دستگاه می‌باشد. بیشتر انتقال حرارت از سطح آب شور به شیشه با کمک تبخیر صورت می‌پذیرد که وابسته به انتقال حرارت جابجایی می‌باشد. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابجایی از عوامل مهم در بررسی انتقال حرارت درونی دستگاه می‌باشد. پژوهشگران بسیاری انتقال حرارت درونی در آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. همان گونه که اشاره شد، ضریب انتقال حرارت جابجایی رابطه‌ای مهم می‌باشد که در بررسی انتقال حرارت درونی دستگاه مورد مطالعه قرار گیرد. در سال ۱۹۶۱ شخصی به نام دانکل (Dunkle) رابطه‌ای تجربی را بر اساس معادله‌ی زیر ارائه نمود [۳].

$$Nu = (h_{cw} \cdot d) / k = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (12)$$

$Nu$  و  $Gr$  و  $Pr$  به ترتیب بیانگر اعداد بدون بعد ناسلت (Nusselt)، گراشف (Grashof) و پرانتل (Prandtl) می‌باشند.  $K$  ضریب رسانش حرارتی آب و  $d$  فاصله‌ی میانگین بین آب شور و شیشه می‌باشد. دانکل با استفاده از داده‌های تجربی در دستگاه آب شیرین‌کن حوضچه‌ای، ضریب‌های ثابت  $c$  و  $n$  را در معادله‌ی (۱۲) به ترتیب برابر با ۰/۰۷۵ و ۰/۳۳ بدست آورد. رابطه‌ی ارائه شده توسط دانکل به صورت زیر می‌باشد.

$$h_{cw} = 0.884 \left[ \frac{T_w - T_g + (P_w - P_g)(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (13)$$

$$P(T) = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T + 273}\right) \quad (14)$$

بررسی پارامترهای مختلف بر روی آن بسیار بالاست، در نتیجه مدلسازی آن می‌تواند کمک شایانی به کاهش هزینه‌ها و ساخت یک دستگاه بهینه کند. بررسی منابع نشان می‌دهند که مدلسازی آب شیرین‌کن‌ها توسط CFD کمتر توجه شده است و حتی کار احمد [۲] دو بعدی است. دینامیک سیالات محاسباتی توانمندی گسترده‌ای در مسائل گوناگون دارد. لذا در این تحقیق با استفاده از نرم افزار CFX، مدلسازی آب شیرین‌کن-حوضچه‌ای، جهت بررسی توانمندی CFD در شبیه‌سازی فرایند تقطیر خورشیدی، صورت گرفته است [۳].

## ۲- هندسه مدل

نتایج این مدلسازی با داده‌های تجربی فرشیچی و همکاران [۱] مقایسه شده است. شمای کلی آب شیرین‌کن حوضچه‌ای مدلسازی شده در شکل (۱) نشان داده شده است. سطح مقطع -دستگاه ۰/۴۱ مترمربع است. رسم هندسه مدل و مش بندی توسط -نرم افزار Ansys Workbench 11 انجام گرفته و در شبکه بندی از مش‌های ساختار نایافته استفاده شده است. تعداد گره‌ها ۴۷۱۷۹ است و مش‌ها از نوع چهاروجهی می‌باشد. هندسه سه بعدی این مدل و شرایط مرزی و مش بندی آن در شکل (۲) نشان داده شده است

## ۳- معادلات حاکم بر انتقال حرارت و جرم آب شیرین کن

انتقال حرارت از کف آب شیرین‌کن به آب و وارد شدن پرتوهای خورشید به درون محفظه، موجب گرم شدن آب درون دستگاه می‌گردد. به دلیل تبخیر از سطح آب، بخار آب به درون هوای خشک درون محفظه نفوذ کرده و موجب پیدایش هوای مرطوب می‌گردد. اختلاف دمای بین سطح آب شور و پوشش شیشه‌ای و تغییرات چگالی بخار آب درون محفظه موجب چرخش هوای مرطوب درون دستگاه می‌گردد. اختلاف دمای بوجود آمده درون محفظه موجب انتقال حرارت از سطح

جایجایی درونی آب شیرین کن از رابطه (۱۸) استفاده شده است. همچنین شار جرمی بین دو فاز از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۳].

$$\dot{m}_{ew} = \frac{\dot{q}_{ew} \cdot A_w \cdot t}{h_{fg}} \quad (19)$$

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 \left[ \begin{array}{l} 1 - 9.4779 \times 10^{-4} T + \\ 1.3132 \times 10^{-7} T^2 - \\ 4.7974 \times 10^{-9} T^3 \end{array} \right] \quad (20)$$

for  $T < 70^\circ C$

که  $h_{fg}$  بیانگر گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد.  $t$  و  $\dot{q}_{ew}$  نیز به ترتیب بیانگر زمان بر حسب ثانیه و میزان انتقال حرارت با کمک تبخیر می‌باشد. میزان  $\dot{q}_{ew}$  با توجه به رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد. که  $h_{ew}$  از رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$\dot{q}_{ew} = h_{ew} (T_w - T_g) \quad (21)$$

#### ۴- نتایج مدل سازی و تحلیل

مدل سازی بصورت سه بعدی برای سیستم آب- مخلوط هوا و بخار آب توسط نرم افزار CFX 11 انجام شده است. در این مدل سازی دمای شیشه و کف آب شیرین کن در دمای ثابت، مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. دیواره‌های جانبی، آدیاباتیک فرض شده‌اند. دمای اولیه آب طبق داده‌های تجربی برای هر ساعت بصورت جداگانه در نظر گرفته شده و ارتفاع آب اولیه در ابتدای فرآیند ۴ سانتی متر می‌باشد.

آزمایش‌های تجربی در ۱۴ ساعت انجام گرفته است. چهار مرحله ۱ ساعته از کل فرآیند در زمان‌های مختلف مدل سازی شده است. در هر ساعت آزمایش شرایط مرزی و خواص تقریباً

در رابطه‌ی فوق  $T_w$ ،  $T_g$  به ترتیب دمای سطح آب و شیشه می‌باشد  $P_w$  و  $P_g$  نیز به ترتیب بیانگر فشار بخار اشباع روی سطح آب و شیشه می‌باشد. همچنین  $h_{ew}$  نیز ضریب انتقال حرارت جایجایی از سطح آب به شیشه را نشان می‌دهد.

کوپر (cooper) در سال ۱۹۷۳ رابطه‌ای برای ضریب انتقال حرارت تبخیر  $h_{ew}$  بصورت زیر ارائه نمود [۳].

$$h_{ew} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cw} \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (15)$$

در رابطه‌ی فوق  $h_{cw}$  ضریب انتقال حرارت جایجایی از سطح آب به شیشه می‌باشد که از رابطه دانکل بدست می‌آید. ضریب انتقال حرارت تابشی  $h_{rw}$  نیز با توجه به رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود [۳].

$$h_{rw} = \varepsilon_{eff} \sigma [(T_w + 273)^2 + (T_g + 273)^2] [T_w + T_g + 546] \quad (16)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \quad (17)$$

در رابطه‌ی بالا  $\varepsilon_w$  و  $\varepsilon_g$  به ترتیب بیانگر ضریب نشر آب و شیشه می‌باشند و  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن است.

برای تعیین ضریب انتقال حرارت کلی از سطح آب به شیشه می‌توان مجموع ضرایب انتقال حرارت اشاره شده را به دست آورد که در رابطه‌ی (۱۸) نشان داده شده است.

$$h_{total} = h_{rw} + h_{cw} + h_{ew} \quad (18)$$

در این مدل سازی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت

نشان می‌دهد که CFD توانایی طراحی، بررسی پارامترهای مختلف و رفع مشکلات در ساخت آب شیرین‌کن‌ها را دارد.

ثابت هستند. داده‌های تجربی این چهار مرحله در جدول (۱) درج شده‌اند.

#### ۶- مراجع

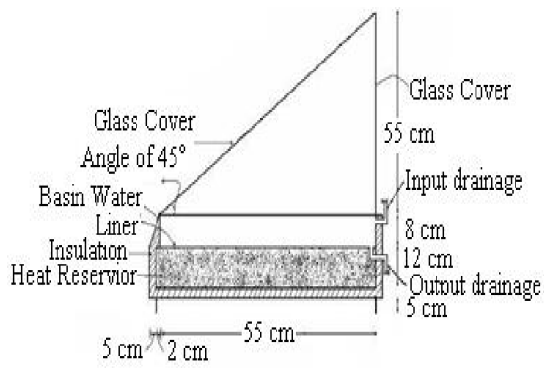
- [1] Farshchi Tabrizi, F., Zolfaghari Sharak, A., "Experimental study of an integrated basin solar still with a sandy heat reservoir", *Desalination*, 253, 195-199, 2009.
- [2] Ahmed, M.I., Hrairi, M., Ismail, A.F., "On the characteristics of multistage evacuated solar distillation", *Renewable Energy*, 34, 1471-1478, 2009.
- [3] Tiwari, G.N., "Solar energy. Fundamentals, designs, modeling and application", CRC press, 279-309, 2002.
- [4] Abdenacer, P.K., Nafila, S., "Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar still global efficiency", *Desalination*, 209, 298-305, 2007.
- [5] Delyannis, E., "Historic background of desalination and renewable energies", *Solar Energy*, 75, 357-366, 2003.
- [6] Abdenace, P.K., Nafila, S., "Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar still global efficiency", *Desalination*, 209, 298-305, 2007.
- [7] Tiwari, G. N., Garag, H. P., "Studies on various designs of solar distillation systems", *Solar & wind technology* 1, 161-165, 1985.
- [8] Rahim, N.H.A., "Utilisation of new technique to improve the efficiency of horizontal solar desalination still", *Desalination*, 138, 121-128, 2001.
- [9] Radhwan, A.M., "Transient performance of stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage", *Desalination*, 171, 61-76, 2004.

هدف این مدل‌سازی CFD، شبیه‌سازی مکانیسم انتقال جرم و حرارت بین آب و پوشش شیشه‌ای و بررسی ضریب انتقال حرارت می‌باشد. میزان آب شیرین تولید شده توسط آب شیرین‌کن، حاصل از نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی فرشچی و همکاران [۱] مقایسه شده که مقایسه نتایج در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشخص است داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارد. برای بقیه ساعات آزمایش هم می‌توان به همین طریق این شبیه‌سازی را انجام داد.

اختلاف دمای بخار آب و شیشه سبب چگالش بخار آب و ایجاد آب روی سطح شیشه می‌شود. قطرات آب ایجاد شده روی سطح شیشه لغزیده و پایین می‌آید، سپس در ناودان که در لبه پایین شیشه قرار دارد جمع شده و از سیستم خارج می‌گردد. در شکل (۳) کنتور جزء حجمی آب روی شیشه و در شکل ۴ کنتور جزء حجمی آب از نمای کنار دستگاه نشان داده شده است. در شکل ۵ ضریب انتقال حرارت جابجایی و تبخیر بررسی شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله پدیده تبخیر و چگالش که در آب‌شیرین‌کن خورشیدی صورت می‌گیرد، مدل‌سازی شده است. مدل دو-فازی سه‌بعدی برای فرآیند آب‌شیرین‌کن با استفاده از CFD ارائه شده است. مدل‌سازی برای سیستم آب - مخلوط آب و بخار آب با استفاده از نرم افزار CFX 11 انجام گرفته است. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارد. ضریب انتقال حرارت جابجایی و تبخیر بدست آمده از مدل‌سازی از مقادیر فرمول دانکل بیشتر است. نتایج مدل‌سازی

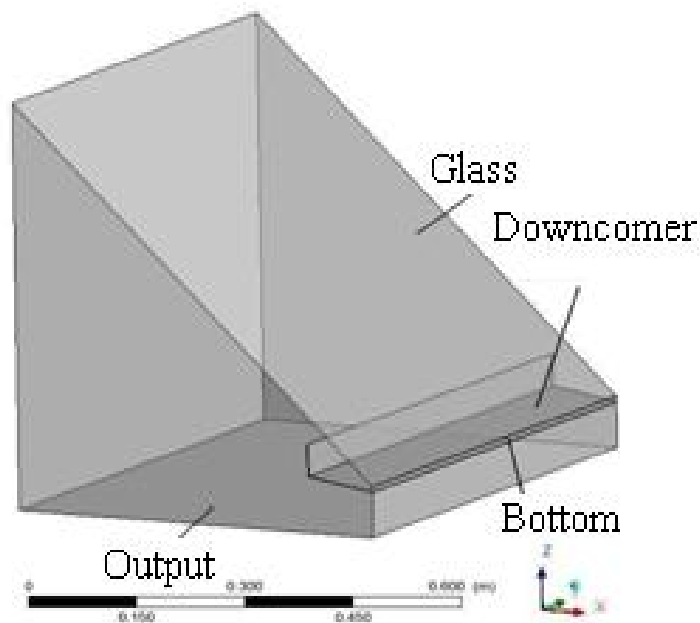


[10]Mowla, D., Karimi, G., “ Mathematical modeling of solar stills in Iran”, Solar Energy, 55, 389-393, 1995.

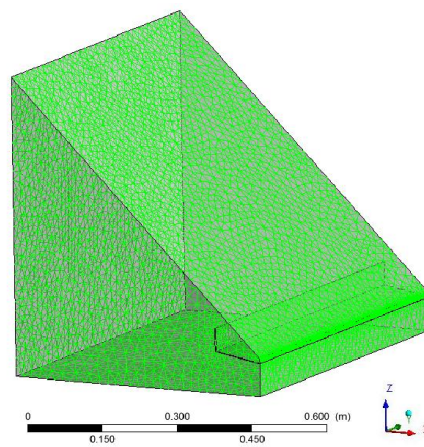
[۱۱] خشنودی، م. و نوعی، م.، "اصول و کاربرد انتقال حرارت"،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۰، ایران

شکل (۱): طرحواره دستگاه آب شیرین کن حوضچه ای از کنار

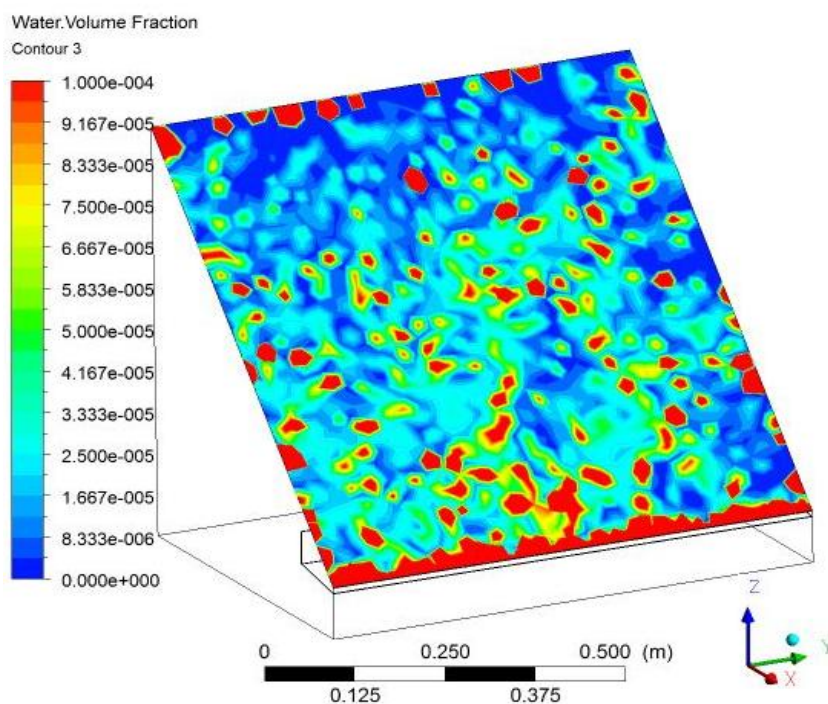


(الف)

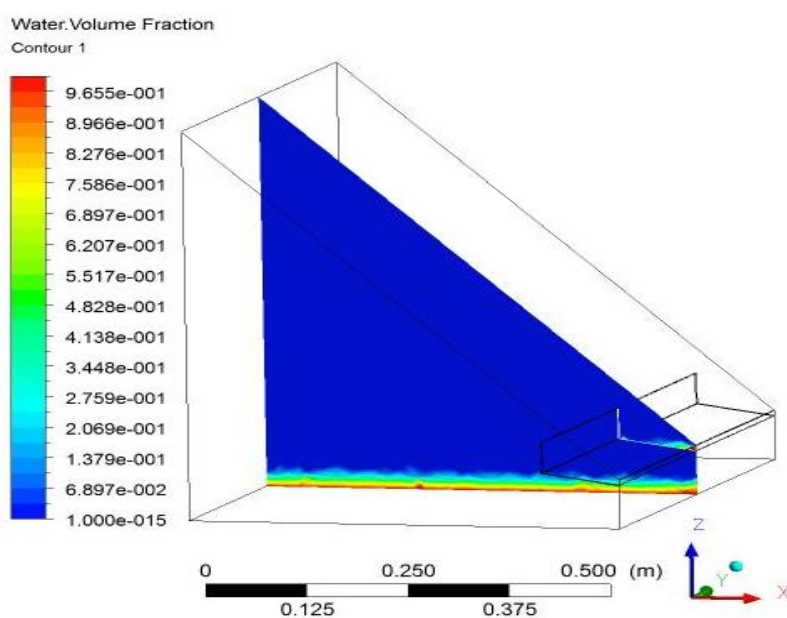


(ب)

شکل (۲): (الف) فضای محاسباتی استفاده شده در مدل سازی و شرایط مرزی، (ب) مش بندی هندسه مدل



شکل (۳): کنتور جزء حجمی آب روی شیشه



شکل (۴): کنتور جزء حجمی آب از نمای کنار دستگاه

جدول (۱): داده‌های تجربی آب شیرین کن حوضچه‌ای فرشچی و همکاران [۱]

ساعت	پارامتر	۱۱:۳۰-۱۲:۳۰	۱۳:۳۰-۱۴:۳۰	۱۵:۳۰-۱۶:۳۰	۱۷:۳۰-۱۸:۳۰
	دمای آب (°C)	۴۹	۵۹	۵۸	۵۰
	دمای کف (°C)	۴۱	۵۰	۵۳	۵۱
	دمای شبشه (°C)	۳۳	۳۸	۳۸	۳۴
	میزان تابش خورشید (W/m <sup>2</sup> )	۴۵۶	۸۰۰/۷۵	۹۷۹/۵	۸۷۷/۵
	میزان آب شیرین تولیدی (cc)	۸۷/۹۸	۱۲۶/۶۹	۱۴۳/۰۹	۱۲۹/۱۵

جدول (۲) مقایسه نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی

ساعت	میزان آب شیرین	۱۱:۳۰-۱۲:۳۰	۱۳:۳۰-۱۴:۳۰	۱۵:۳۰-۱۶:۳۰	۱۷:۳۰-۱۸:۳۰
	میزان آب شیرین تولیدی تجربی (cc)	۸۷/۹۵	۱۲۶/۶۹	۱۴۳/۰۹	۱۲۹/۱۵
	میزان آب شیرین تولیدی با CFD (cc)	۸۰/۹۸	۱۱۶/۱۱	۱۳۱/۰۸	۱۱۷/۵۸
	درصد خطا*	۸/۶۱	۹/۱۱	۹/۱۶	۹/۸۴

\* متوسط درصد خطا % ۹/۱۸ می‌باشد .