



یک مدل جدید برای جریان دو فاز درون یک آب شیرین کن خورشیدی اصلاح شده با یک لایه متخلخل

علیرضا پورموید^{۱*}، رضا رحمتی^۲ و محسن غلامی^۳

^۱ مربی، عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران

^۲ مدرس، دانشکده مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران

^۳ کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷

چکیده

در این تحقیق، مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فاز بخار-مایع درون یک آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار یک‌طرفه به کار گرفته شد. این مدل می‌تواند جهت ردیابی فصل مشترک بین فازهای مایع و بخار هنگام تغییر فاز استفاده شود. به منظور ارزیابی دقت مدل ارائه شده، نتایج حل عددی بدست آمده توسط این مدل با نتایج تجربی و نتایج عددی مدل دیگر شبیه‌سازی آب شیرین کن خورشیدی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که مدل حجم سیال ارائه شده، نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به نتایج تجربی را نسبت به مدل پیشین شبیه‌سازی آب شیرین کن خورشیدی ارائه می‌کند. پس از شبیه‌سازی، پتانسیل استفاده از اسفنج، به عنوان یک ماده متخلخل ارزان برای افزایش تولید آب مقطر درون آب شیرین کن خورشیدی بررسی شد. اسفنج سطح مؤثر بیشتری برای تبخیر و جذب تشعشع درون آب شیرین کن فراهم می‌کند؛ همچنین این ماده دارای خاصیت فتیله‌ای بوده و آب را به سطح خود جهت تبخیر منتقل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان تولید آب مقطر توسط آب شیرین کن خورشیدی، حدود ۱۰ درصد با به کارگیری ماده متخلخل اسفنج با نفوذپذیری ۰/۶ افزایش می‌یابد؛ همچنین مشاهده شد که میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های بیشتر از ۰/۶ افزایش می‌یابد، درحالی‌که میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های کمتر از ۰/۶ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی شیب‌دار یک‌طرفه؛ مدل حجم سیال؛ اسفنج؛ بهره‌وری.

A New Model for Two-Phase Flow in a Solar Still Improved by a Porous Layer

A. R. Pourmoayed^{1*}, R. Rahmati², M. Gholami³

¹ Department of Mechanical Engineering, Khatmol Anbia Air Defense, Tehran, Iran.

² Department of Mechanical Engineering, Khatmol Anbia Air Defense, Tehran, Iran.

³ Department of Mechanical Engineering, K. N. Tossi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In current research, the volume of fluid (VOF) model is used to model the vapor-liquid two-phase flow in a single slope solar still. This model can be used to track the interface between liquid and vapor phases during the phase change. To evaluate the accuracy of VOF model, the numerical results are compared with the experimental data and the results of previous model for simulating solar still. It was found that the volume of fluid model predicts the experimental data with more accuracy in comparison with the previous model. After simulation, the effect of using a sponge layer as the cheap porous material on productivity of the solar still is investigated. Sponge layer provides more effective surface for evaporation and solar radiation absorption inside the solar still. Moreover, the sponge has wick property and transfers the water to evaporation surface. The results showed that the pure water production of the solar still enhances about 10% by employing a porous layer with porosity of 0.6. Moreover, it is observed that the productivity increases with decreasing the porosity of sponge layer for porosities higher than 0.6, while the productivity decreases with decreasing the porosity of sponge layer for porosities less than 0.6.

Keywords: Single Slope Solar Still; Volume of Fluid Model; Sponge; Productivity.

۱- مقدمه

آب یکی از کمیابترین منابع موجود در جهان با توجه به نیاز بشر است و از اساسیترین الزامات فعالیت‌های بشری محسوب می‌شود و اهمیت زیست‌محیطی آن را نمی‌توان نادیده انگاشت. یک‌سوم از جمعیت جهان از مشکل کمبود آب رنج می‌برند و این روند در کشورهایی مانند، ایران، چین، هند و آمریکا رو به افزایش است. متأسفانه فعالیت‌های بشری، موجبات تنزل کمی و کیفی منابع آب را فراهم ساخته است. پیش‌بینی‌ها حاکی بر این است که در سال ۲۰۲۵ میلادی به علت بحران کمبود آب از هر سه انسان، یک نفر با مشکل کمبود آب مواجه خواهد شد [۱]. حجم آب‌های موجود در کره زمین، در حدود ۱/۴ میلیارد کیلومتر مکعب است، اما بیشتر آب موجود در زمین آب شور است. دریاها ۹۷٪ از آب قابل‌دسترس در زمین هستند. ۵٪ از آب‌ها در لایه بالایی یا اتمسفر (ابرها) وجود دارند. منابع آب شیرین در زمین تنها ۳۵ میلیون کیلومتر مکعب است [۲] (تقریباً ۲/۵٪ کل حجم آب‌های زمین) که از این مقدار ۶۸/۹٪ آب‌های شیرین (در حدود ۲۴ میلیون کیلومتر مکعب) به‌صورت برف و یخ در کوهستان‌ها و دو قطب شمالی و جنوبی زمین ذخیره شده‌اند که به‌سختی برای مصرف بشر قابل دسترسی‌اند؛ همچنین قسمت عمده منابع باقیمانده آب شیرین، جزء منابع آب زیرزمینی به شمار می‌روند. در نتیجه کل ذخیره آب قابل‌دسترس برای بشر، چیزی بیشتر از ۲۰۰ هزار کیلومتر مکعب نیست که مصرف بیش‌از حد همین میزان آب نیز، باعث برهم خوردن بوم‌سازگان عمومی زمین می‌شود. پس تنها حدود ۰/۱۴٪ از منابع آب کره زمین برای مصرف قابل‌دسترس است.

این موضوع، اهمیت استفاده از روش‌های مناسب جهت شیرین نمودن آب‌های شور را نشان می‌دهد. روش‌های مرسوم برای شیرین‌سازی آب شور بکار گرفته شده‌اند که شامل، اسمز معکوس^۱، تقطیر^۲، الکترودیالیز^۳ و غیره می‌باشند. هزینه بالای ساخت، تعمیر و نگهداری و از همه مهم‌تر نیاز به مصرف برق، از جمله معایب این‌گونه روش‌ها است. به‌علاوه

ظرفیت زیاد و عدم کاربری این روش‌ها برای مناطق با جمعیت کم موجب می‌شود که استفاده از این‌گونه روش‌ها در روستاها غیرممکن باشد [۱]. آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به‌عنوان روشی مناسب برای حل مشکلات مذکور می‌باشند. از مهم‌ترین مزایای این وسایل می‌توان به استفاده از انرژی پاک خورشید و نداشتن هیچ‌گونه آلودگی صوتی یا زیست‌محیطی نام برد. یکی از معایبی که آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی با آن درگیر هستند، پایین بودن راندمان این‌گونه وسایل می‌باشد. بنابراین، استفاده از روش‌های مناسب جهت بهبود راندمان آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. مطالعات تجربی و عددی زیادی در زمینه آب شیرین‌کن‌های خورشیدی انجام شده است.

یکی از روش‌های بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی، تحلیل آزمایشگاهی است. مهم‌ترین مزیت روش تحلیل تجربی این است که در محیط واقعی آزمایش انجام می‌پذیرد و در صورت دقیق بودن تجهیزات مورد استفاده، نتایج بسیار به واقعیت نزدیک می‌باشند؛ اما در بیشتر حالات انجام چنین آزمایش‌هایی به علت بزرگ بودن اندازه‌های دستگاه‌ها، گران و اغلب غیر ممکن است. به‌همین دلیل آزمایش‌ها با اندازه‌هایی در مقیاس کوچک‌تر انجام می‌شوند. هرچند باید به خاطر داشت که در بسیاری از حالت‌ها، مشکلات جدی وجود داشته و وسایل اندازه‌گیری خالی از خطا نمی‌باشند که این می‌تواند یکی از معایب این روش شمرده شود. از معایب دیگر این روش، می‌توان به محدودیت محیط آزمایشگاه، محدودیت ابزار سنجش و خطر آزمایش اشاره نمود. در این قسمت به برخی از مطالعات تجربی انجام‌شده روی آب‌شیرین‌کن خورشیدی پرداخته می‌شود.

برخی محققان از روش‌های تجربی فعال برای بهبود عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده کردند. به‌عنوان مثال، در پژوهشی نصاری^۴ و همکاران [۳]، با استفاده از یک کمپرسور یخچال به‌منظور متراکم کردن بخار آب برای چگالش بهتر و همچنین با استفاده از کلکتورهای بیضوی برای گرم کردن آب، میزان ۲۰ لیتر بر متر مربع در روز را برای دستگاه خود گزارش کردند. ابوعلی^۵ و همکاران [۴]، با استفاده از شیشه دوجداره و عبور آب از بین دوجداره شیشه،

¹ Reverse osmosis

² Distillation

³ Electrodialysis

⁴ Fathi Nassar

⁵ Abu-Arabi

آزمایشگاهی روی یک آب شیرین کن شیب دار یک طرفه شامل، جاذب‌های حرارتی متخلخل با اینرسی حرارتی پایین به صورت شناور درون تشتک انجام دادند. جاذب متخلخل از پارچه کنفی سیاه ساخته شده بود. با توجه به اینرسی حرارتی کم جاذب متخلخل، آن‌ها به دمای کاری بالاتری دست یافتند که نهایتاً منجر به افزایش عملکرد آب شیرین کن شد. ۶۸٪ و ۳۵٪ به راندمان آب شیرین کن به ترتیب در روزهای کاملاً صاف و تا حدودی صاف با این تغییر اضافه شدند.

یکی از روش‌های تحلیل عددی، دینامیک سیالات محاسباتی است که ابزاری قدرتمند برای بررسی متغیرها و مقاصد تحلیلی و تشخیصی است. تاکنون از این روش جهت تحلیل و بررسی فرآیندهای انتقال حرارت، جریان سیال درون آب شیرین کن‌ها و غیره استفاده‌های وسیعی شده است. از مزایای این روش، به این موارد می‌توان اشاره کرد: هزینه کم ساخت و تحقیق، افزایش سرعت دستیابی به نتایج، به دست آوردن اطلاعات کامل از نتایج به دست آمده، توانایی شبیه‌سازی شرایط واقعی و ایده‌آل، حل مسائل وابسته به زمان در حالت‌های مختلف، تحلیل شرایط مرزی مختلف، توانایی مطالعه دستگاه‌هایی که انجام آزمایش‌ها روی آن‌ها مشکل و غیرممکن یا تحت شرایط تصادفی باشند. داشتن خطا و نیاز به کامپیوترهای نسبتاً قوی با حافظه بالا برای تعریف مسئله، از معایب این روش می‌باشند که امروزه، با ساخت سامانه‌های کامپیوتری با پردازنده‌های قوی تقریباً این مشکل برطرف گردیده است [۱۰].

با توجه به مزایای روش‌های عددی، برخی محققین از این روش‌ها برای بررسی عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی استفاده نمودند. به عنوان مثال، ستوده و همکاران [۱۱]، به بررسی اثرات زاویه سطح چگالش شیب دار روی کارکرد آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آنها شبیه‌سازی را برای زوایای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه انجام دادند و بیش‌ترین آب تقطیر شده را برای زاویه ۴۵ درجه به دست آوردند.

درون آب شیرین کن‌های خورشیدی به دلیل اختلاف دمای سطوح آب و شیشه، انتقال حرارت جابجایی آزاد وجود دارد. برخی از محققین، تولید جابجایی آزاد درون یک حفره را

به بررسی تأثیر خنک‌کاری شیشه در بهبود کارایی دستگاه پرداختند. آن‌ها با مدل کردن ریاضی روابط حاکم بر فرایندهای تبخیر و تقطیر در آب شیرین کن خورشیدی، همچنین استفاده از نتایج عملی حاصل از آزمایش خود، بهبود در عملکرد را برای این دستگاه گزارش کردند. برخی از محققان از روش‌های تجربی غیر فعال برای افزایش راندمان آب شیرین کن‌های خورشیدی استفاده کردند. ولموروگان^۱ و همکاران [۵]، با قرار دادن صفحات مواج (قرار دادن پره در کف) در کف آب شیرین کن، به بررسی تأثیر این روش در افزایش راندمان دستگاه پرداختند. آنان افزایش ۵۳٪ را با استفاده از این روش در تولید آب خروجی گزارش نمودند. کابیل^۲ و ابدالجاید^۳ [۶]، از مواد تغییر فاز دهنده^۴ به عنوان یک ذخیره‌ساز حرارتی درون آب شیرین کن خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که میزان تولید آب مقطر خروجی به میزان ۶۷/۱۸٪ نسبت به آب شیرین کن معمولی افزایش می‌یابد.

اخیراً، مواد متخلخل در سیستم‌های مختلف انرژی خورشیدی استفاده شده است که در آن انتقال حرارت به کمک همرفت و تابش به‌طور هم‌زمان از اهمیت خاصی برخوردارند. در تحقیقی کابیل [۷] با استفاده از الیاف پارچه‌ای در سطح مقعری شکل مخزن ورودی، توانست میزان تبخیر را تا حدودی افزایش دهد. در طرح آزمایشی وی با بهره‌گیری از سطح هرمی شکل در قسمت فوقانی به‌عنوان سیستم چگالنده دستگاه، آب خروجی به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. استفاده از فتیله کنفی (الیاف پارچه‌ای)، موجب افزایش میزان جذب تابش خورشید و میزان تبخیر شد. این افزایش به دلیل تأثیر رطوبت موئینگی است. نافی^۵ و همکاران [۸]، قطعات لاستیک و شن را درون آب شیرین کن خورشیدی به‌منظور افزایش بهره‌وری قرار دادند. آن‌ها دریافتند که بهره‌وری روزانه آب شیرین کن خورشیدی با افزایش ضخامت لاستیک و اندازه ذرات ماسه افزایش می‌یابد. سیرواستاوا^۶ و آگراوال^۷ [۹] بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی

¹ Velmurugan

² Kabeel

³ Abdelgaied

⁴ Phase change material

⁵ Nafey

⁶ Srivastava

⁷ Agrawal

۲- بیان مسئله

هندسه‌ی بررسی شده در این تحقیق، در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، یک آب‌شیرین‌کن شیب‌دار یک طرفه دوبعدی به ارتفاع سمت راست H_r ، ارتفاع سمت چپ H_l ، طول L و زاویه پوشش شیشه‌ای θ مدل می‌شود. در کف آب‌شیرین‌کن، در ابتدا لایه‌ای از آب به ضخامت S قرار دارد و بالای این سطح، بخار آب وجود دارد. لایه متخلخلی از جنس اسفنج با ضخامت S در کف آب شیرین‌کن قرار داده می‌شود. دماهای سطوح پوشش شیشه‌ای و دیواره پایینی به ترتیب برابر، T_g و T_b در نظر گرفته می‌شوند؛ همچنین دیواره‌های جانبی آب‌شیرین‌کن به صورت عایق در نظر گرفته می‌شوند. دقت شود در آب شیرین‌کن‌های واقعی، معمولاً دیواره‌های جانبی برای کاهش اتلاف حرارتی به صورت عایق در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعه از فرضیات زیر استفاده شده است:

- جریان به صورت گذرا، دوبعدی و در رژیم آرام در نظر گرفته شده است.
- از شرط تعادل دمایی بین فازهای مایع و جامد درون لایه متخلخل استفاده می‌شود. این شرط وقتی معتبر است که در مسئله واکنش شیمیایی وجود نداشته باشد و یا اختلاف دمای بین فازهای مایع و جامد درون لایه متخلخل زیاد نباشد.
- چگالی، ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی اسفنج به ترتیب برابر ۱۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ۲۹۹۶ ژول بر کیلوگرم در درجه کلوین و ۰/۰۵ وات بر متر در درجه کلوین می‌باشند.
- ضخامت لایه متخلخل، برابر ضخامت لایه آب در لحظه اولیه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم

به طور کلی، مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فازي استفاده می‌شود که در آن تغییر در فصل مشترک بین دو فاز مهم است [۱۶]. بر این اساس، فصل مشترک بین فازهای بخار و مایع را می‌توان با استفاده از این مدل ردیابی کرد. ردیابی فصل مشترک بین فازها با حل یک معادله

بررسی کردند که شبیه هندسه یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. زحمتکش [۱۲] تولید آنتروپی نانو سیالات در همرفت طبیعی در محفظه‌های متخلخل مستطیل شکل را بررسی کرد. وی دریافت که حضور تبادل تابش و اثرات غیرداری، تأثیر قابل توجهی در انتقال حرارت و تولید آنتروپی در محفظه دارند. علوی و همکاران، شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد درون یک حفره^۱ را بررسی نمودند [۱۳]. رضوانی و همکاران [۱۴]، تولید آنتروپی را برای جابجایی طبیعی درون یک حفره بررسی کردند. رالابندی^۲ و همکاران [۱۵]، تأثیرات میدان مغناطیسی را روی جابجایی طبیعی اطراف یک صفحه متخلخل عمودی بررسی کردند. مروری بر منابع گذشته نشان داد که در بیشتر بررسی‌های عددی درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی، از مدل هوای مرطوب استفاده شده است؛ درحالی‌که این مدل دارای محدودیت‌هایی است که باید برطرف گردند. این مدل فضای درون آب‌شیرین‌کن از بالای سطح آب تا سطح شیشه را به صورت هوای مرطوب (مخلوط هوا و بخار) در نظر می‌گیرد و فقط به مدل‌سازی این قسمت از آب‌شیرین‌کن می‌پردازد؛ همچنین این مدل قادر به شبیه‌سازی تغییر فاز نمی‌باشد که در اثر چگالش و تبخیر درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی روی می‌دهد. همچنین با وجود انجام چندین مورد کار تجربی برای بررسی پتانسیل استفاده از مواد متخلخل درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی جهت افزایش تولید آب مقطر، هیچ‌گونه کار عددی در این زمینه وجود ندارد؛ لذا در این تحقیق، ابتدا مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فازي بخار-مایع درون یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی شیب‌دار یک طرفه به کار گرفته می‌شود. این مدل توانایی ردیابی فصل مشترک بین فازهای مایع و بخار را هنگام تغییر فاز دارا است؛ همچنین فرآیندهای تبخیر و چگالش درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی، توسط این مدل شبیه‌سازی می‌شوند. پس از شبیه‌سازی، پتانسیل استفاده از اسفنج به عنوان یک ماده متخلخل ارزان برای افزایش تولید آب مقطر درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی می‌شود.

¹ Cavity

² Rallabandi

ناحیه سیال خالص، ضرایب β و ε به ترتیب برابر صفر و یک می‌باشند. معادله انرژی در این مدل به فرم رابطه (۵) است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [V(\rho E)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

انرژی (E) در معادله بالا به صورت متوسط جرمی از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Phase}} \rho_i \alpha_i C p_i T_i}{\sum_{i=1}^{n_{Phase}} \rho_i \alpha_i} \quad (6)$$

انتقال حرارت حین تغییر فاز در آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از یک جمله چشمه در معادله بالا مدل‌سازی می‌شود (S_h).

۲-۲- شرایط مرزی

همانطور که قبلاً اشاره شد، سطوح بالایی و پایینی آب-شیرین‌کن به صورت دما در نظر گرفته شده‌اند؛ همچنین، دیواره‌های کناری آب‌شیرین‌کن به صورت مرز عایق در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس، شرایط مرزی مسأله مطابق روابط (۷) تا (۹) است.

روی سطح شیشه:

$$u = v = 0, T = T_g \quad (7)$$

روی سطح آب:

$$u = v = 0, T = T_b \quad (8)$$

روی دیواره‌های جانبی:

$$u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

۲-۳- تعریف پارامترهای مورد استفاده

پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

عدد ناسلت متوسط:

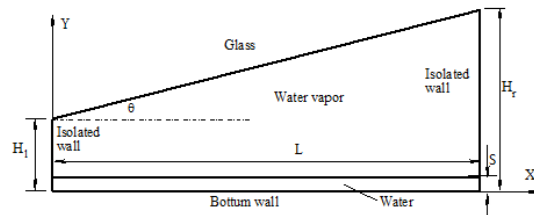
$$Nu_{ave} = \frac{-H_{ave}}{L(T_b - T_g)} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{wall} dx \quad (10)$$

H_{ave} میانگین ارتفاع دیواره‌های چپ و راست آب‌شیرین‌کن است.

میزان تولید آب مقطر ساعتی:

$$\dot{m}_v = -\dot{m}_l = \frac{2k_l \times (\nabla \alpha_l \times \nabla T)}{h_{fg}} \quad (11)$$

که در آن h_{fg} آنتالپی تبخیر آب در درجه حرارت متوسط محیط بوده و در این تحقیق مقدار h_{fg} برابر ۲۲۶۰ کیلوژول بر



شکل ۱- نمای شماتیک آب‌شیرین‌کن

پیوستگی برای کسر حجمی^۱ تعداد یک (یا بیشتر) فاز انجام می‌شود. این معادله برای فاز نام به صورت رابطه (۱) است:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + V_i \cdot \nabla \alpha_i = \rho_i \sum_{j=1}^n (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) \quad (1)$$

\dot{m}_{ij} انتقال جرم از فاز j به i و \dot{m}_{ji} انتقال جرم از فاز i به فاز j است. همچنین α کسر حجمی است. معادله کسر حجم برای فاز اولیه حل نخواهد شد. برای فاز اولیه، کسر حجمی باید در هر سلول محاسبه شده و مجموع این متغیر یک سلول برابر یک باشد:

$$\sum_{i=1}^{n_{Phase}} \alpha_i = 1 \quad (2)$$

در این جا آب به عنوان فاز اولیه و بخار آب به عنوان فاز ثانویه لحاظ شده است. چگالی یک جریان دو فاز در هر سلول با استفاده از مقادیر متوسط از هر دو فاز به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

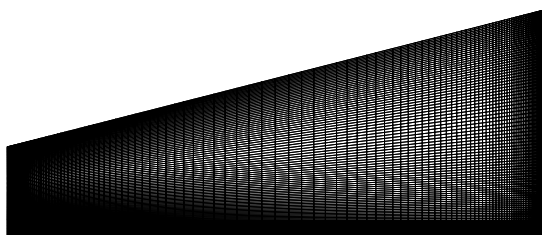
$$\rho = \rho_i \alpha_i + (1 - \alpha_i) \rho_j \quad (3)$$

روشی مشابه برای محاسبه گران روی و هدایت حرارتی یک جریان دو فاز استفاده می‌شود. در مدل حجم سیال، یک معادله مومنوم واحد برای این جریان حل شده و میدان سرعت به دست آمده بین فازها به اشتراک گذاشته می‌شود. این معادله به صورت رابطه (۴) ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \cdot (\rho V V) \right] \\ = -\nabla p - \beta \left[\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{\sqrt{K}} |V| \right] V \\ + \nabla \cdot \left[\frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla V) \right] + \rho g + F \end{aligned} \quad (4)$$

که F در این معادله، نیروهای کشش سطحی در فصل مشترک بین دو فاز را نشان می‌دهد [۱۷]. دقت شود برای

^۱ Volume Fraction



شکل ۲ - نمونه‌ای از شبکه مورد استفاده برای آب شیرین کن

جدول ۱ - تأثیرات تعداد شبکه روی میزان تولید آب شیرین

توسط آب شیرین کن			
مورد	تعداد شبکه	میزان تولید آب شیرین (kgm ⁻² h ⁻¹)	درصد اختلاف (%)
۱	۱۷۰۰	۲۲/۹۱۰	۱/۵
۲	۳۴۰۰	۲۳/۲۵۹	۰/۹
۳	۶۸۰۰	۲۳/۴۷۱	۰/۳
۴	۱۳۶۰۰	۲۳/۵۴۲	----

و همچنین میزان آب مقطر تولید شده ثبت می‌شوند. از این دماها به‌عنوان شرط مرزی حل عددی استفاده شده است. جزئیات شرایط آزمایش و کلیه دماها، در مقاله پورموید و همکاران [۱۹] موجود است. جدول ۲، مقایسه بین نتایج تجربی و حل عددی به دو روش هوای مرطوب و حجم سیال را برای میزان آب مقطر تولیدی توسط آب شیرین کن در ۴ ساعت آزمایش ارائه می‌کند. انتخاب این چهار ساعت به این دلیل است که در این ساعات، میزان آب مقطر تولیدی توسط آب شیرین کن نسبت به سایر ساعات قابل توجه است. از این جدول ملاحظه می‌شود که ماکزیمم خطا بین نتایج بدست آمده از طریق آزمایش و نتایج عددی محاسبه شده توسط روش‌های هوای مرطوب برابر ۱۶ درصد است؛ در حالی که این میزان خطا برای روش حجم سیال ۱۰ درصد است؛ در نتیجه، روش حجم سیال نتایج نزدیک‌تری نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌کند که می‌تواند بیان‌گر دقت بیشتر این مدل باشد. لازم به‌ذکر است که مدل هوای مرطوب، فقط بالای سطح آب تا سطح شیشه را به‌صورت هوای مرطوب در نظر گرفته و شبیه‌سازی فقط در این محدوده بدون در نظر گرفتن تغییر فاز از طریق تبخیر و چگالش انجام می‌شود؛ درحالی که مدل حجم سیال این قابلیت را دارد که تمام فضای آب شیرین کن را

کیلوگرم در نظر گرفته شده است. k_i و α_i به ترتیب، هدایت حرارتی فاز مایع و کسر حجمی فاز مایع می‌باشند.

۳- روش حل عددی

معادلات حاکم به همراه شرایط مرزی مربوطه با کمک نرم افزار فلوئنت و با استفاده از روش حجم محدود^۱ و حلگر فشار مینا^۲ حل می‌شوند. ترم‌های فشار و سرعت بوسیله الگوریتم سیمپل^۳ [۱۸] مرتبط شده و گسسته‌سازی همه معادلات حاکم با استفاده از طرح بالادست مرتبه دوم^۴ صورت می‌پذیرد. معیار همگرایی^۴ 10^{-6} برای تمام معادلات لحاظ شده است.

۴- بررسی استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

شبکه استفاده شده در این مسأله، در شکل ۲ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در این مسأله از یک شبکه غیر یکنواخت با تعداد بیشتر در اطراف دیواره‌های بالایی، پایینی و جانبی، استفاده شده است. به منظور اطمینان از مستقل از شبکه بودن نتایج، میزان تولید آب شیرین، برای چهار شبکه با اندازه متفاوت محاسبه شده و نتایج در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اختلاف میزان تولید آب شیرین برای شبکه با تعداد ۶۸۰۰ و ۱۳۶۰۰ تنها ۰/۳٪ است؛ لذا شبکه ۶۸۰۰ گره‌ای، مناسب برای استفاده در این مسأله است.

به منظور ارزیابی دقت روش حجم سیال، نتایج این روش با نتایج تجربی [۱۹] و نتایج عددی بدست آمده توسط روش هوای مرطوب [۱۹] برای یک آب شیرین کن شیب دار یک-طرفه مقایسه شده است. آب شیرین کن مدل شده، دارای طول ۰/۴ متر، ارتفاع سمت چپ ۰/۱۶ متر و ارتفاع سمت چپ ۰/۰۷ متر است. دقت شود، حل عددی آب شیرین کن به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در مقاله پورموید و همکاران موجود است، آزمایش در تاریخ ۲۰۱۶/۰۸/۳۰ از ساعت ۹ صبح تا ۴ عصر انجام شده است و در هر ساعت دماهای سطوح آب، شیشه و دیواره پایینی

¹ Finite Volume

² Pressure Based

³ SIMPLE Algorithm

⁴ Second-Order Upwind

جدول ۲- مقایسه بین نتایج تجربی و حل عددی با روش‌های هوای مرطوب و حجم سیال برای آب مقطر تولیدی در ۴ ساعت آزمایش

ساعت	میزان تجربی آب مقطر ($\text{ccm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	میزان عددی آب مقطر ($\text{ccm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	درصد خطا (%)
روش هوای مرطوب (پورموید و همکاران [۲۲])			
۱۱	۷۱۸	۶۳۹	۱۳:۰۰-۱۲:۰۰
۱۳	۸۲۰	۷۱۳	۱۴:۰۰-۱۳:۰۰
۱۲	۷۶۰	۶۶۹	۱۵:۰۰-۱۴:۰۰
۱۶	۶۲۵	۵۲۹	۱۶:۰۰-۱۵:۰۰
روش حجم سیال (مطالعه حال حاضر)			
۷	۷۱۸	۶۶۷	۱۳:۰۰-۱۲:۰۰
۹	۸۲۰	۷۴۶	۱۴:۰۰-۱۳:۰۰
۸	۷۶۰	۶۹۹	۱۵:۰۰-۱۴:۰۰
۱۰	۶۲۵	۵۶۲	۱۶:۰۰-۱۵:۰۰

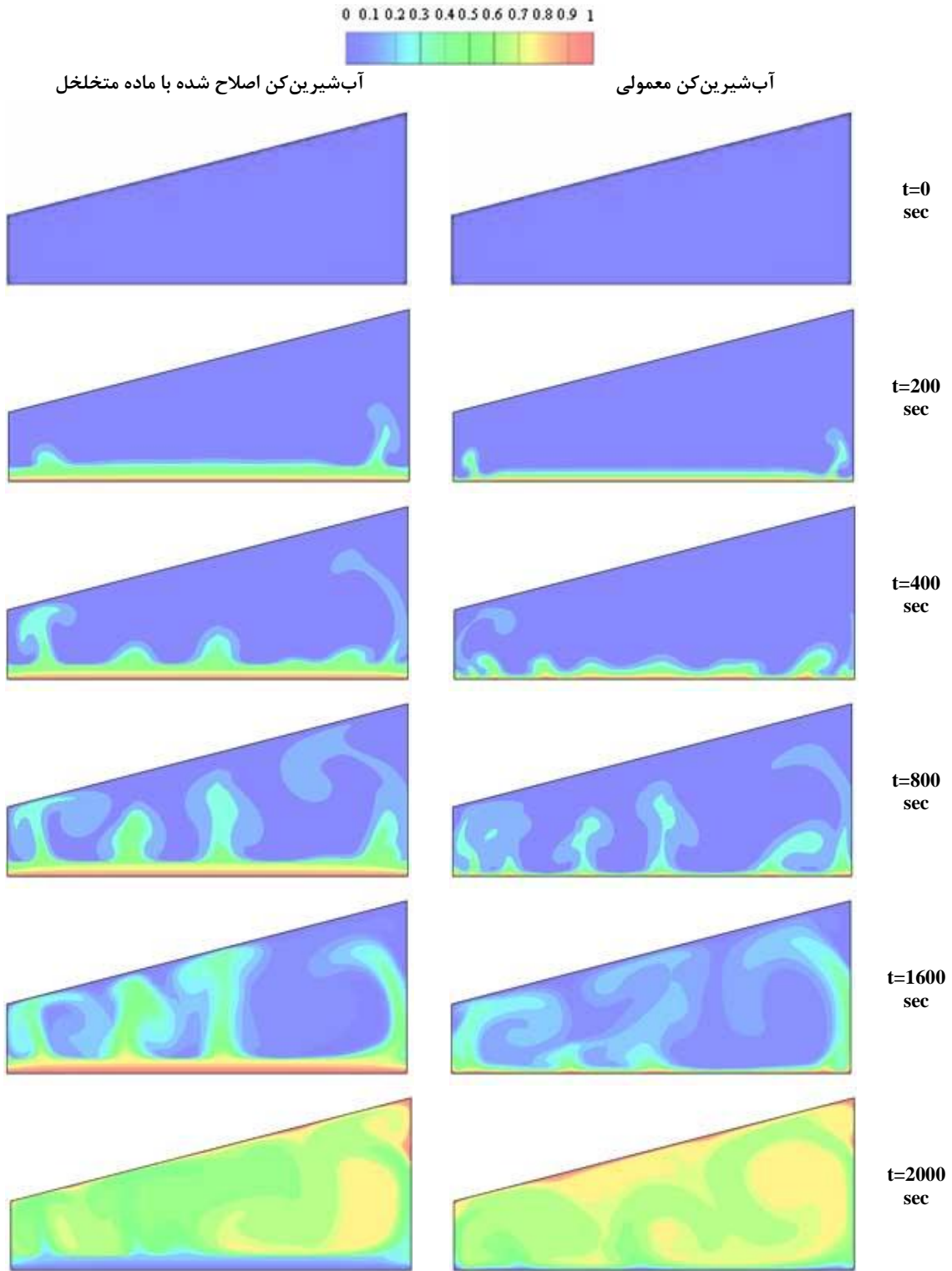
بخار را بین شیشه و سطح آب درون آب‌شیرین‌کن منتقل می‌کنند. از میدان دما برای فاز بخار می‌توان دریافت که تغییرات کمی در دمای بخار در مرکز آب‌شیرین‌کن مشاهده می‌شود؛ درحالی‌که تغییرات نسبتاً شدیدی در دمای آن در نزدیکی دیواره‌های بالایی و پایینی در آب‌شیرین‌کن دیده می‌شود. این تغییرات می‌تواند ناشی از فرآیندهای چگالش روی سطح شیشه و تبخیر در سطح پایینی آب‌شیرین‌کن باشند. شکل ۵ تأثیرات نفوذپذیری لایه متخلخل بر میزان تولید آب مقطر توسط آب‌شیرین‌کن خورشیدی را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که نفوذپذیری یک ($\varepsilon=1$) در این شکل، آب‌شیرین‌کن معمولی بدون قرار دادن لایه متخلخل را نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های بیشتر از ۰/۶ افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که سطح موثر تبخیر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل افزایش یافته و این سبب افزایش در نرخ تبخیر و نهایتاً تولید آب مقطر بیشتری درون آب‌شیرین‌کن می‌گردد. حدود ۱۰ درصد افزایش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از ۱ به ۰/۶ کاهش پیدا کند؛ همچنین، میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های کمتر از ۰/۶ کاهش می‌یابد.

با در نظر گرفتن فصل مشترک بین دو فاز (فاز مایع و بخار) و با در نظر گرفتن تغییر فاز از طریق تبخیر و چگالش مدل کند.

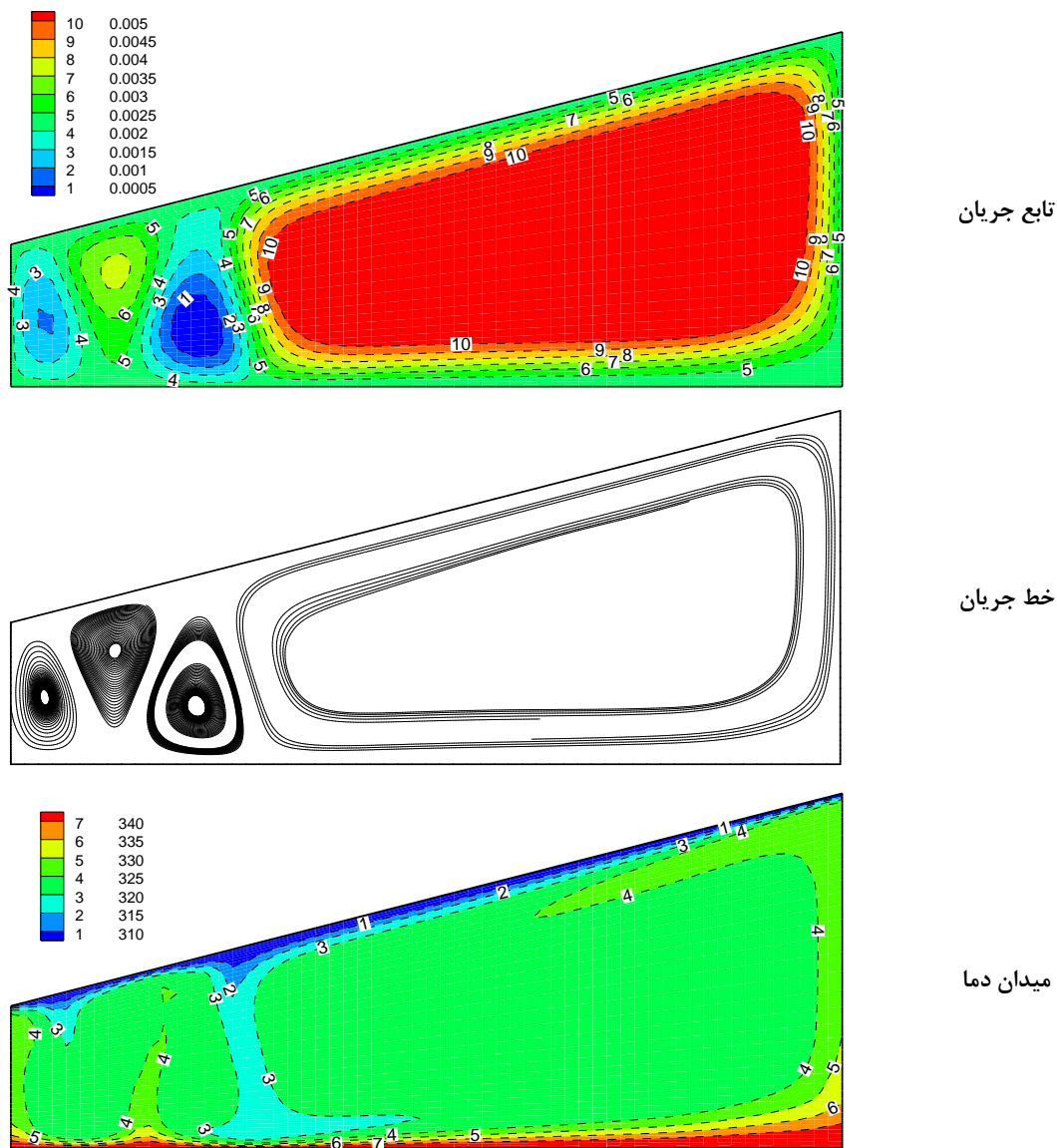
۵- نتایج و بحث

شکل ۳ میدان‌های کسر حجمی بخار آب درون آب‌شیرین‌کن‌های معمولی و اصلاح شده با ماده متخلخل را در طی زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. ماده متخلخل از جنس اسفنج با تخلخل ۰/۷ در کف آب‌شیرین‌کن قرار داده شده است. از این شکل می‌توان دریافت که در لحظه ابتدایی، هیچ بخاری درون آب‌شیرین‌کن وجود ندارد. با گذشت زمان، تغییر فاز رخ داده و فاز بخار با افزایش دمای سطح آب درون آب‌شیرین‌کن تشکیل می‌شود. همان‌طوری‌که از این شکل مشاهده می‌شود، تغییر فاز از افزایش کسر حجمی فاز ثانویه (بخار آب) درون آب‌شیرین‌کن قابل مشاهده است. درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی، فاز بخار از سطح آب برخاسته و به سمت سطح شیشه بالایی در اثر جابجایی آزاد ایجاد شده توسط اختلاف دما بین سطوح آب و شیشه حرکت می‌کند. با برخورد بخار آب به شیشه بالایی که در دمای پایین‌تری قرار دارد، بخار چگالیده شده و آب مقطر تولید می‌شود. از کسر جرمی بخار در لحظه ۲۵۰۰ ثانیه می‌توان دریافت که کسر حجمی بخار در کف آب‌شیرین‌کن در این لحظه به علت تبخیر تمامی آب موجود کاهش یافته و در عوض کسر حجمی بخار روی شیشه به دلیل انتقال بخار توسط جابجایی آزاد، افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که مقادیر تبخیر و چگالش با قرار دادن لایه متخلخل درون آب‌شیرین‌کن اصلاح شده نسبت به آب‌شیرین‌کن معمولی افزایش می‌یابند که این امر از افزایش کسر حجمی فاز ثانویه (فاز بخار) قابل مشاهده است. دقت شود یک لایه متخلخل، سطح موثر بیشتری جهت انتقال حرارت جابجایی و تبخیر درون آب‌شیرین‌کن خورشیدی فراهم می‌کند.

شکل ۴ میدان‌های تابع جریان، خطوط جریان و دما را برای فاز بخار درون آب‌شیرین‌کن معمولی بدون استفاده از لایه متخلخل نمایش می‌دهد. از میدان تابع جریان مشاهده می‌شود که چهار گردابه در این حالت درون آب‌شیرین‌کن تشکیل می‌شود. گردش این گردابه‌ها، منجر به ایجاد انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌شود؛ زیرا این گردابه‌ها انرژی حرارتی و



شکل ۳- میدان کسر حجمی بخار آب درون آب شیرین کن‌های معمولی و اصلاح شده با ماده متخلخل



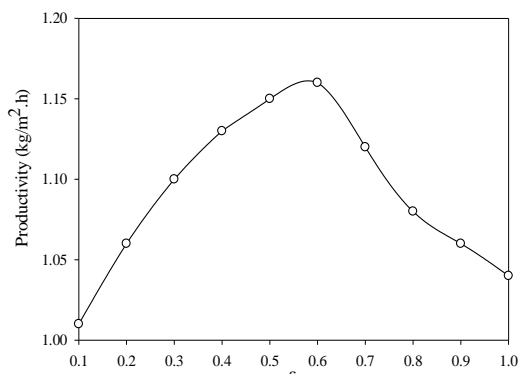
شکل ۴- تابع جریان، خط جریان و میدان دما برای آب شیرین کن معمولی

بهینه نفوذپذیری است که حداکثر تولید آب مقطر توسط آب شیرین کن در آن اتفاق می‌افتد. شکل ۶ تأثیرات نفوذپذیری لایه متخلخل بر عدد ناسلت میانگین روی دیواره بالایی آب شیرین کن خورشیدی را نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که عدد ناسلت میانگین با افزایش نفوذپذیری لایه متخلخل افزایش می‌یابد، اما این افزایش بین نفوذپذیری ۰/۳ تا ۰/۶ مشهودتر است. حدود ۱۴ درصد کاهش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از ۰/۱ به ۱ افزایش پیدا کند.

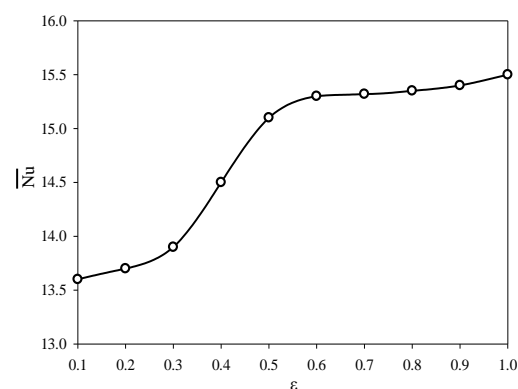
دقت شود که برای مقدار بسیار پایین نفوذپذیری ماده متخلخل، لایه متخلخل به عنوان یک قطعه جامد عمل می‌کند و سطح مرطوب برای تبخیر، به ویژه داخل لایه متخلخل کاهش می‌یابد. این منجر به کاهش تولید آب مقطر توسط آب شیرین کن برای مقادیر بسیار پایین نفوذپذیری لایه متخلخل می‌شود. حدود ۱۳ درصد کاهش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از ۰/۶ به ۰/۱ کاهش پیدا کند. به عنوان نتیجه، نفوذپذیری ۰/۶ مقدار

و تغییر فاز مایع- بخار درون یک آب شیرین کن خورشیدی شبیه‌دار یک‌طرفه ارائه شد. سپس، پتانسیل استفاده از مواد متخلخل درون آب شیرین کن خورشیدی به کمک این روش بررسی شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با مدل هوای مرطوب، روش حجم سیال نتایج نزدیک‌تری نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌کند که می‌تواند بیان‌گر دقت بیشتر این مدل باشد. بعد از شبیه‌سازی آب شیرین کن توسط مدل حجم سیال، پتانسیل به کارگیری اسفنج به عنوان یک ماده متخلخل ارزان برای افزایش تولید آب مقطر درون آب شیرین کن خورشیدی به صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان داد، مقادیر تبخیر و چگالش با قرار دادن لایه متخلخل درون آب- شیرین کن اصلاح شده نسبت به آب شیرین کن معمولی افزایش می‌یابند. دقت شود یک لایه متخلخل، سطح مؤثر بیشتری جهت انتقال حرارت جابجایی و تبخیر درون آب- شیرین کن خورشیدی فراهم می‌کند. میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های بیشتر از $0/6$ افزایش می‌یابد. حدود 10 درصد افزایش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از 1 به $0/6$ کاهش پیدا کند؛ همچنین، میزان تولید آب مقطر با کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل برای نفوذپذیری‌های کمتر از $0/6$ کاهش می‌یابد. حدود 13 درصد کاهش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از $0/6$ به $0/1$ کاهش پیدا کند. به عنوان نتیجه، نفوذپذیری $0/6$ مقدار بهینه نفوذپذیری است که حداکثر تولید آب مقطر توسط آب شیرین کن در آن اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد که عدد ناسلت میانگین با افزایش نفوذپذیری لایه متخلخل افزایش می‌یابد، اما این افزایش بین نفوذپذیری $0/3$ تا $0/6$ مشهودتر است. حدود 14 درصد کاهش در تولید آب مقطر زمانی مشاهده می‌شود که نفوذپذیری لایه متخلخل از $0/1$ به 1 افزایش پیدا کند.

در پایان لازم به توضیح است که در یک آب شیرین کن واقعی، نمک‌ها و املاح به مرور زمان در ماده متخلخل رسوب ایجاد می‌کنند و ممکن است، منافذ ماده متخلخل را مسدود نمایند. این می‌تواند در بلند مدت عملکرد آب شیرین کن را تحت تأثیر قرار دهد. به منظور کاهش این اثر منفی لازم است، پس از هر بار استفاده از آب شیرین کن، لایه متخلخل به کار رفته در آن به دقت شستشو گردد.



شکل ۵- تأثیرات نفوذپذیری لایه متخلخل بر میزان تولید آب مقطر توسط آب شیرین کن خورشیدی



شکل ۶- تأثیرات نفوذپذیری لایه متخلخل بر عدد ناسلت میانگین روی دیواره بالای آب شیرین کن خورشیدی

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در بیشتر بررسی‌های عددی درون آب شیرین کن خورشیدی، از مدل هوای مرطوب استفاده شده است، درحالی‌که این مدل دارای محدودیت‌هایی است که باید این محدودیت‌ها برطرف گردند. این مدل فضای درون آب شیرین کن از بالای سطح آب تا سطح شیشه را به صورت هوای مرطوب (مخلوط هوا و بخار) در نظر می‌گیرد و فقط به مدل‌سازی این قسمت از آب- شیرین کن می‌پردازد؛ همچنین این مدل قادر به شبیه‌سازی تغییر فاز نیست که در اثر چگالش و تبخیر درون آب شیرین کن خورشیدی روی می‌دهد؛ همچنین با وجود انجام چندین مورد کار تجربی برای بررسی پتانسیل استفاده از مواد متخلخل درون آب شیرین کن خورشیدی جهت افزایش تولید آب مقطر، هیچ‌گونه کار عددی در این زمینه وجود ندارد؛ لذا در این تحقیق، یک مدل جدید برای جریان دو فاز

چپ	l		۷- فهرست علائم
راست	r	ضریب فرجهایم	C
فاز بخار	v	انرژی داخلی (Jkg^{-1})	E
دیواره	w	نیرو (Nm^{-3})	F

۸- مراجع

[1] Dwivedi VK, Tiwari GN (2010) Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode. *Desalination* 250(1): 49-55.

[2] Kharabsheh SA, Goswami DY (2003) Analysis of an innovative water desalination system using low-grade solar heat. *Desalination* 156: 323-332.

[3] Nassar YF, Yousif SA, Salem AA (2007) The second generation of the solar desalination systems. *Desalination* 209: 177-181.

[4] Abu-Arabi M, Zurigat Y, Al-Hinai H, Al-Hiddabi S (2002) Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling. *Desalination* 143: 173-182.

[5] Velmurugan V, Deenadayalan CK, Vinod H (2008) Srithar K. (2008) Desalination of effluent using fin type solar still, *Energy*, 33: 1719-1727.

[6] Kabeel AE, Abdelgaied M (2016) Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions. *Desalination* 383: 22-28.

[7] Kabeel AE (2009) Performance of solar still with a concave wick evaporation surface. *Energy* 34: 1504-1509.

[8] Nafey AS, Abdelkader M, Abdelmotalip A, Mabrouk AA (2001) Solar still productivity enhancement. *Energy Convers Manage* 42: 1401-1408.

[9] Srivastava PK, Agrawal SK (2013) Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers. *Solar Energy* 311: 198-205.

[10] El-Sebaai AA, Ramadan MRI, Aboul-Enein S, El-Naggar M (2015) Effect of fin configuration parameters on single basin solar still performance. *Desalination* 365: 15-24.

[11] Setoodeh N, Rahimi R, Ameri A (2011) Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD. *Desalination* 268: 103-110.

[۱۲] زحمتکش الف (۱۳۹۳) تولید آنتروپی نانو سیالات در همرفت طبیعی در محفظه های متخلخل مستطیل شکل. *مجله علمی پژوهشی سازه ها و شماره ها* ۱۸۴-۱۷۱: (۳): ۴.

شتاب جاذبه (ms^{-2})	g
آنتالپی تبخیر آب (Jkg^{-1})	h_{fg}
فاصله بین سطوح شیشه و آب شور (m)	H
ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	k
تراوایی (m^2)	K
طول آب شیرین کن (m)	L
شار جابجایی جرم حین تغییر فاز ($kgm^{-3}h^{-1}$)	\dot{m}
میزان تولید آب مقطر ($ccm^{-2}h^{-1}$)	\dot{m}
عمود	n
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	p
ضخامت لایه متخلخل (m)	S
ترم چشمه حرارتی ناشی از تغییر فاز ($Jm^{-3}s^{-1}$)	S_h
زمان (s)	t
دما (K)	T
سرعت (ms^{-1})	V
سرعت افقی (ms^{-1})	u
سرعت عمودی (ms^{-1})	v
مؤلفه افقی (m)	x
مؤلفه عمودی (m)	y

علائم یونانی

کسر حجمی	α
ضریب	β
نفوذپذیری	ε
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
زاویه شیب پوشش شیشه ای (degree)	θ
چگالی (kgm^{-3})	ρ

زیر نویس ها

میانگین	ave
بالا	b
پوشش شیشه ای	g
فاز	i, j
فاز مایع	l

- [16] Hirt CW, Nichols BD (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys* 39: 201-225.
- [17] Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C (1992) A continuum method for modeling surface tension. *J Comput Phys* 100: 335-354.
- [18] Patankar SV (1980) Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere, New York.
- [۱۹] پورموید ع، رحمتی ر، برخورداری هـ (۱۳۹۶) آنالیز تولید آنتروپی موضعی برای یک آب شیرین کن خورشیدی شیبدار یک طرفه (بررسی عددی). *مجله علمی پژوهشی سازه‌ها و شماره‌ها*، پذیرفته شده.
- [۱۳] علوی ن، ارمغانی ط، ایزدپناه الف (۱۳۹۵) انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه L شکل بافلدار. *مجله علمی پژوهشی سازه‌ها و شماره‌ها* ۳۱۱-۳۲۱ (۳): ۶.
- [14] Rezvani A, Valipour MS, Biglari M (2016) Numerical study of entropy generation for natural convection in cylindrical cavities. *J Heat Mass Transf Res (JHMTR)* 3: 89-99.
- [15] Rallabandi SR, Anitha G, Reddy J (2017) Heat and mass transfer effects on MHD natural convective flow past a vertical porous plate through analytical and numerical results.