

بررسی عددی تاثیر شکل هندسی جاذب بر عملکرد یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی تک شیب

چکیده

کمبود آب شیرین و مشکلات شیرین سازی آب شور باعث شده تا استفاده از آب شیرین کن های خورشیدی برای تولید آب شیرین بیش از قبل، قابل اهمیت باشد و توجه افراد و صنایع زیادی به این سیستم خورشیدی جلب شده است. از حدود ۲۲ میلیون مترمکعب آب شیرین تولید شده روزانه، کمتر از ۱ درصد آن با استفاده از انرژی خورشیدی تولید می شود. تولید آب شیرین و خالص با استفاده از روش های رایج مانند نمک زدایی و اسمز معکوس انرژی بر می باشد و این روش ها به سوخت های فسیلی متکی می باشند اما استفاده از آب شیرین کن خورشیدی نه تنها کم هزینه و اقتصادی می باشد بلکه نیاز به سوخت فسیلی ندارد و منابع انرژی را حفظ می کند. در این پژوهش جاذب یک آب شیرین کن خورشیدی تک شیب در یازده هندسه متفاوت با شرایط یکسان مورد ارزیابی عددی قرار گرفت. هدف از انجام این پژوهش یافتن بهترین حالت برای طراحی صفحه جاذب در آب شیرین کن خورشیدی است. نتیجه نشان داد بهترین حالت برای ساخت یک آب شیرین کن خورشیدی ساده حالت (C) می باشد، در این حالت دمای جاذب با توجه به شدت تابش خورشیدی ۷۵۰ وات بر مترمربع به ۳۴۹ کلوین می رسد و مقدار آب تقطیر شده نسبت به سایر حالت ها بیشتر می باشد، و بعد از آن هندسه (b) دارای بهترین عملکرد می باشد.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی؛ شکل جاذب؛ انرژی خورشیدی؛ انتقال حرارت جابجایی؛ انتقال حرارت تشعشعی

Abstract

The lack of fresh water and the problems of salt water desalination have made the use of solar desalinators to produce fresh water more important than before, and the attention of many people and industries has been drawn to this solar system. Out of about 22 million cubic meters of fresh water produced daily, less than 1% of it is produced using solar energy. The production of fresh and pure water using common methods such as desalination and reverse osmosis is energy-intensive and these methods rely on fossil fuels, but the use of solar water desalination is not only low-cost and It is economical, but it does not need fossil fuel and conserves energy resources. In this study, the absorber of a single-slope solar desalination plant was numerically evaluated in eleven different geometries with the same conditions. The purpose of this research is to find the best way to design the absorber plate in solar desalination. The result showed that the best mode for making a simple solar water softener is mode (C), in this mode, the temperature of the absorber reaches 349 Kelvin due to the intensity of solar radiation of 750 watts per square meter, and the amount of distilled water compared to other modes are more, and after that geometry (b) has the best performance.

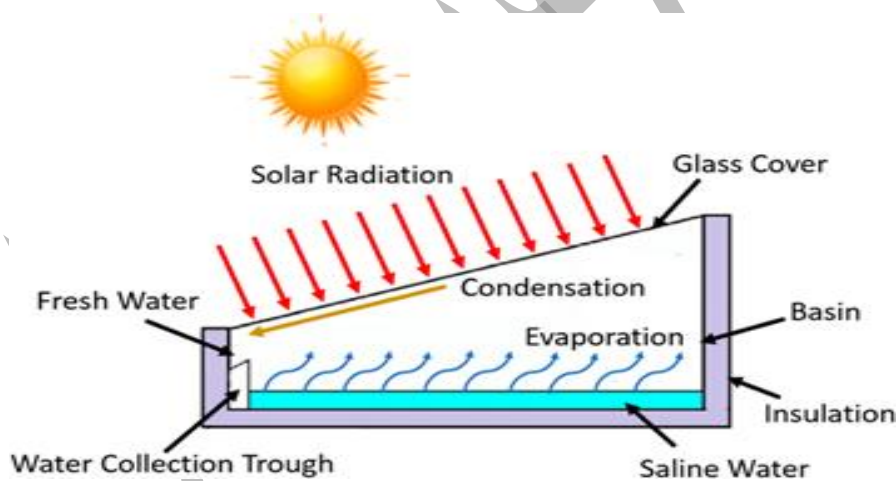
key words: solar still; absorbent form; Solar energy, convection heat transfer, radiation heat transfer

۱- مقدمه

محدودیت در وجود سوخت های فسیلی و آلودگی هوا یکی از مشکلات اصلی بشر در جامعه امروزی می باشد. این نکته باعث شده است تا توجه سیاست های مختلف را به سمت انرژی های تجدیدپذیر خورشیدی هدایت کند. کره زمین دارای ۷۱ درصد آب و ۲۹ درصد خشکی بوده با این وجود بحران آب یکی از اساسی ترین مشکلات جامعه بشری بشمار می رود، زیرا فقط ۳ درصد از منابع آب در سطح دنیا شیرین می باشد که همین ۳ درصد نیز بسیاری از آن به صورت آبهای زیرزمینی و یا به صورت یخ موجود است [۱]. شیرین سازی آب موضوعی بوده که انسان از گذشته های دور به روش های مختلف انجام داده و آب شیرین مورد نیاز خود را تأمین کرده است. روش های شیرین سازی برگرفته از مکانیزم و فرآیندهای بارش باران است. خورشید بر سطح آب دریاها و اقیانوس ها تابیده و تبخیر آب صورت می گیرد. بخار آب در ارتفاعات بالاتر به دلیل پایین بودن دما و وزش باد دچار میعان می شود در این حالت به صورت قطرات آب نزول کرده و جریانی از آب شیرین را تأمین می نماید [۲]. روش های شیرین سازی آب در کارخانجات تصفیه سازی به کمک گرم کردن و تبخیر آب صورت گرفته که جهت تأمین انرژی از سوخت های فسیلی استفاده می گردد. آب شیرین کن های خورشیدی با بکارگیری انرژی خورشیدی در سیکل کاری خود، عملیات گرمایش و تبخیر و شیرین سازی را انجام می دهند، این دستگاه ها، بر اساس قوانین تبخیر و تقطیر کار می کنند. آب شوری که وارد دستگاه می شود، توسط تابش نور خورشید که از سطح شیشه دستگاه عبور می کند گرم می شود. پس از آن آب شور داخل آب شیرین کن، شروع

به تبخیر می‌کند. نمک، میکروب و دیگر ذرات موجود در آب در تشتک این دستگاه باقی می‌ماند و بخار آب حاصل از این فرآیند، فاقد هیچ‌گونه مواد خواهد بود. بخار آب به سمت بالا حرکت می‌کند و در سطح زیری شیشه تقطیر جمع می‌گردد، که امروزه در کشورهای در حال پیشرفته برای تامین آب شیرین بجای استفاده از روش‌های صنعتی و استفاده از سوخت‌های فسیلی از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی استفاده می‌کنند. در این راستا تحقیقات زیادی در مورد آب شیرین کن‌های خورشیدی چه بصورت تجربی و چه بصورت عددی انجام شده است تا بهترین بازده را بتوان دریافت کرد. رهبر و اصفهانی [۳] به بررسی برآورد بهره‌وری یک آب شیرین‌کن ثابت خورشیدی تک شیب به صورت نظری و تحلیل عددی پرداخته‌اند، آن‌ها در پژوهش خود یک معادله جدید مبتنی بر قیاس چیلتون - کولبرن برای برآورد بهره‌وری یک خورشید ثابت پیشنهاد کردند و در انتها بیان کردند که نتایج، تطابق قابل قبولی با مدل‌های حل شده تجربی و عددی دارد. سوناوان و همکاران [۴] به بررسی تاثیر مواد جاذب مختلف در آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از نرم افزار کامسول پرداخته‌اند در انتها بیان کردند که خروجی ساعتی واحد آب شیرین کن خورشیدی، با مواد جاذب مختلف (جوهر سیاه، رنگ سیاه و تونر سیاه)، در یک ساعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. المشال و ماتیکی [۵] به بررسی عددی اثر شیب سطح خورشیدی شناور مجهز به یک بافل و انتقال حرارت جابجایی پرداخته‌اند و در آخر بیان کردند که پیکربندی بافل مثلی مناسب‌ترین طراحی برای افزایش عملکرد حرارتی و حل است. میتال [۶] به بررسی یک مدل سازی ناپایدار شبیه سازی از آب شیرین کن خورشیدی تک شیب پرداخته‌اند و بیان کرد که این مدل از شرایط مرزی ناپایدار دما در سطح بالا و پایین به عنوان ورودی استفاده می‌کند و بازده تقطیر را برای کل روز فراهم می‌کند و در آخر خاطر نشان کرد که علاوه بر این، شبیه‌سازی نمونه نشان می‌دهد که مدل ویژگی‌های جریان را در داخل محفظه آب شیرین کن خورشیدی به خوبی توصیف می‌کند. پراکاش و همکاران [۷] به تجزیه و تحلیل جامع برنامه نرم افزار طراحی در آب شیرین کن خورشیدی واحدهای تقطیر آن پرداخته‌اند. آن‌ها در کار خود به مروری جامع بر ابزارهای نرم‌افزاری مختلف مورد استفاده در خورشیدی پرداخته‌اند که هنوز هم برای کمک به محققان، دانشمندان و دانشجویان مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشتکار و جعفر پور [۸] یک روش جدید برای مدل‌سازی گذرا آب شیرین‌کن‌های خورشیدی ارائه کردند آن‌ها در کار خود به جای استفاده از تکنیک‌های چند فازی پرهزینه، معادله‌ها برای بخار آب با کوپلینگ با معادله انرژی از طریق توابع تعریف شده استفاده کردند و در روش خود گرمای نهان تبخیر، چگالش را به عنوان یک منبع در معادله انرژی در نظر گرفتند و در آخر بیان کردند که این کار می‌تواند روش مناسبی برای شناسایی رفتار یک آب شیرین کن خورشیدی باشد ال صبابی و همکاران [۹] به تجزیه و تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی برای آب شیرین کن‌های خورشیدی تک شیب با نوع حوضچه معمولی پرداخته‌اند و بیان کردند نتایج شبیه‌سازی توافق قابل قبولی با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده دارد. سوراپاراجو و همکاران [۱۰] به بررسی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در طراحی شیرین‌کن‌های خورشیدی که می‌تواند باعث بهبود عملکرد آن‌ها شود پرداخته‌اند. نتیجه‌گیری آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های جاذب آب شیرین کن خورشیدی شود. تایواری و سینق [۱۱] به بررسی استفاده از نانوذرات در آب شیرین کن خورشیدی پرداخته‌اند آن‌ها بیان کردند که استفاده از نانوذرات، می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید آب شیرین کن خورشیدی شود. میکا و همکاران [۱۲] به بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با وجود سیستم ذخیره ساز و بدون سیستم ذخیره سازی گرمایی فاز تغییر دهنده (PCM) مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم PCM می‌تواند بهبود قابل توجهی در کارایی آب شیرین کن خورشیدی تک شیب به ارمغان آورد. سینی و همکاران [۱۳] به بررسی عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با استفاده از مواد جذب‌کننده انرژی مختلف پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماده جذب‌کننده انرژی انتخاب شده برای جاذب جذب‌کننده، بازده عملکرد شیرین کن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه، سه نوع مختلف از پلاک‌های جذب‌کننده شامل پلاستیک، شیشه و فولاد ضد زنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که جاذب فولادی با بازتابندگی کمتر، بازده بیشتری در تولید آب شیرین دارد. جهان پناه و همکاران [۱۴] تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با دمای پایین بر عملکرد آب شیرین کن خورشیدی تک شیب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داده‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با دمای پایین می‌تواند بهبود قابل توجهی در بازده تولید آب شیرین داشته باشد. در این مطالعه، دو نوع مختلف از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ۸ درجه سلسیوس و ۱۴ درجه سلسیوس مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۸ درجه سلسیوس، بازده بیشتری در تولید آب شیرین دارد. کومار و پاراکاش [۱۵] در این مطالعه، استفاده از یک گرم‌کن خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده به جای جاذب جذب‌کننده سنتی در آب شیرین کن خورشیدی تک شیب مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از گرم‌کن خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند بازده تولید آب شیرین را افزایش دهد. در این مطالعه، دو نوع مختلف از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ۲۴ درجه سلسیوس و ۲۸ درجه

سلسیوس به کار رفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از گرم‌کن خورشیدی با ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۲۸ درجه سلسیوس، بازده بیشتری در تولید آب شیرین داشته است. الاوی و همکاران [۱۶] به بررسی یک آب شیرین کن خورشیدی تک شیب با استفاده از یک ماریچ مسی به عنوان گرم‌کن، یک کندانسور خارجی و مواد تغییر فاز دهنده پرداخته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از یک ماریچ مسی به عنوان گرم‌کن و یک کندانسور خارجی می‌تواند بازده تولید آب شیرین را افزایش دهد. همچنین، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند منجر به افزایش بازده شیرین کن شود. در این مطالعه، دو نوع مختلف از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۳۵ درجه سلسیوس به کار رفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۳۵ درجه سلسیوس، بازده بیشتری در تولید آب شیرین داشته است. کاتکار و همکاران [۱۷] به بررسی مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد آب شیرین کن‌های خورشیدی پرداخته‌اند. در این مطالعه، به بررسی مطالعات پیشین در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در شیرین کن‌های خورشیدی پرداخته شده است. نتایج آن‌ها داده‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند باعث افزایش بازده تولید آب شیرین و کاهش میزان تلفات انرژی شود. همچنین، نوع و دمای مواد تغییر فاز دهنده نیز تأثیر بسزایی بر عملکرد آب شیرین کن دارد. الیوی و همکاران [۱۸] در این مطالعه، یک آب شیرین کن خورشیدی با استفاده از یک لوله بیضوی و مواد تغییر فاز دهنده بررسی شده است. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند باعث افزایش بازده تولید آب شیرین شود. در این مطالعه، دو نوع مختلف از مواد تغییر فاز دهنده با دمای ۲۸ درجه سلسیوس و ۳۴ درجه سلسیوس به کار رفته‌اند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۳۴ درجه سلسیوس، بازده بیشتری در تولید آب شیرین داشته است. نیان و همکاران [۱۹] عملکرد سالانه آب شیرین کن خورشیدی را با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با شکل ثابت با تحلیل اقتصادی بررسی کردند. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با شکل ثابت می‌تواند بازده تولید آب شیرین را بهبود بخشد و همچنین می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش سودآوری منجر شود. در این مطالعه، مواد تغییر فاز دهنده با شکل ثابت با دمای ۲۶ درجه سلسیوس و ۳۲ درجه سلسیوس مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج نشان داده‌اند که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده با دمای ۳۲ درجه سلسیوس، بازده بیشتری در تولید آب شیرین داشته است. در شکل (۱) می‌توان نمایی از یک آب شیرین کن تک شیب را مشاهده کرد.

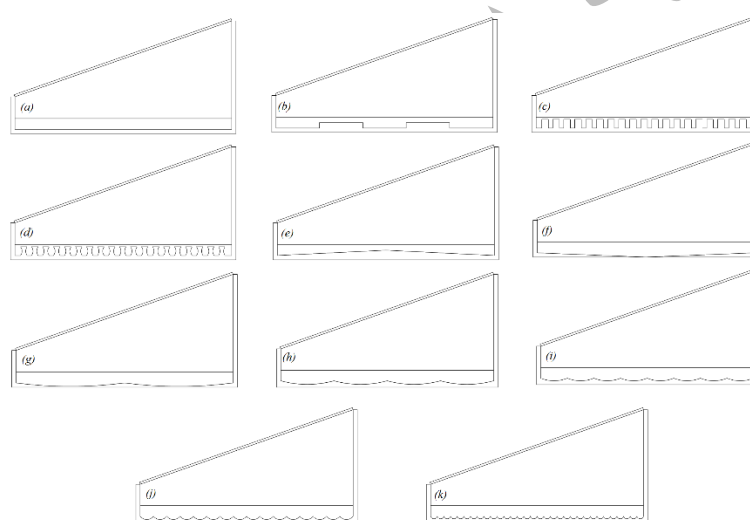


شکل ۱- آب شیرین کن خورشیدی تک شیب

۲- روش حل

در این پژوهش بازده مدل آب شیرین کن خورشیدی تک شیب در حالت دو بعدی آرام و وابسته به زمان توسط نرم افزار کامسول ۶،۱ مورد ارزیابی عددی قرار گرفته‌اند. برای تحلیل عددی دستگاه آب شیرین کن خورشیدی، باید بر اساس شرایط مسئله و ویژگی‌های مدل، تصمیم‌گیری شود که آیا حل به صورت دائم یا غیردائم مناسب است. حل به صورت دائم به معنای این است که در طول زمان، متغیرهای سیستم ثابت و بدون تغییر هستند و حل مسئله بر اساس این شرایط انجام می‌شود. این روش برای مسائلی که شرایط حالت مایل به یک حالت پایدار هستند، مناسب است. اما حل به صورت غیردائم به معنای این است که در طول زمان، متغیرهای سیستم تغییر می‌کنند و حل مسئله بر اساس شرایط پویا انجام می‌شود. این روش برای مسائلی که شرایط حالت پایدار ندارند و تغییرات زمانی اتفاق می‌افتد، مناسب است.

توجه به اینکه در یک دستگاه آب شیرین کن خورشیدی، تغییرات دما، فشار و جریان آب در طول زمان اتفاق می‌افتد، برای تحلیل آن به صورت دقیق، باید حل به صورت غیردائم را در نظر گرفت، همچنین جریان سیال در این پژوهش به صورت تراکم پذیر در نظر گرفته شده است، زیرا تراکم پذیری جریان به این معنی است که حجم بخارات آب به تغییرات دما و فشار وابسته است. در این حالت، با تغییر دما و فشار، حجم بخارات آب نیز تغییر می‌کند. این مدل می‌تواند تغییرات دقیق‌تری را در رفتار دستگاه آب شیرین کن خورشیدی نشان دهد، اما در عین حال محاسبات پیچیده‌تری نیاز دارد. اگر از تراکم ناپذیری بخارات آب استفاده شود، به این معنی است که حجم بخارات آب در شبیه‌سازی ثابت و بدون تغییر است، بنابراین با تغییر دما و فشار، حجم بخارات آب تغییر نمی‌کند. این مدل ساده‌تری است و محاسبات را آسان‌تر می‌کند، اما ممکن است توانایی نمایش دقیق‌تری از رفتار دستگاه را نداشته باشد. به طور کلی، انتخاب بین تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری بخارات آب بستگی به میزان دقت و دقت مورد نیاز شبیه‌سازی دارد. اگر دقت بالاتری در نمایش رفتار دستگاه آب شیرین کن خورشیدی مد نظر باشد، ممکن است تراکم‌پذیری بخارات آب مورد استفاده قرار گیرد. اما اگر سادگی و سرعت محاسبات برای شبیه‌سازی مهمتر است، تراکم‌ناپذیری ممکن است گزینه مناسبی باشد، که در این پژوهش جریان سیال به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است دلیل استفاده از نرم افزار تجاری کامسول ارزیابی بهتر هندسه برای استفاده از شرایط مولتی فیزیک است. هدف از انجام این تحقیق مشخص کردن بهترین هندسه برای طراح جاذب خورشیدی، جهت تولید آب شیرین توسط آب شیرین کن خورشیدی در ابعاد بزرگتر نسبت به سایر هندسه‌ها در دیگر پژوهش‌ها است. در این پژوهش ابتدا هندسه یازده مدل آب شیرین کن خورشیدی که از لحاظ طراحی جاذب با هم تفاوت دارند، توسط نرم افزار کامسول رسم شد، که می‌توان هندسه‌های ترسیم شده را در شکل (۲) مشاهده کرد. سپس توسط نرم افزار داخلی کامسول شبکه بندی شد، سعی بر این شد ناحیه هوای مرطوب و همچنین ناحیه‌های شیشه و سطح آب دارای شبکه‌های ریزتر و با کیفیت‌تر باشند.



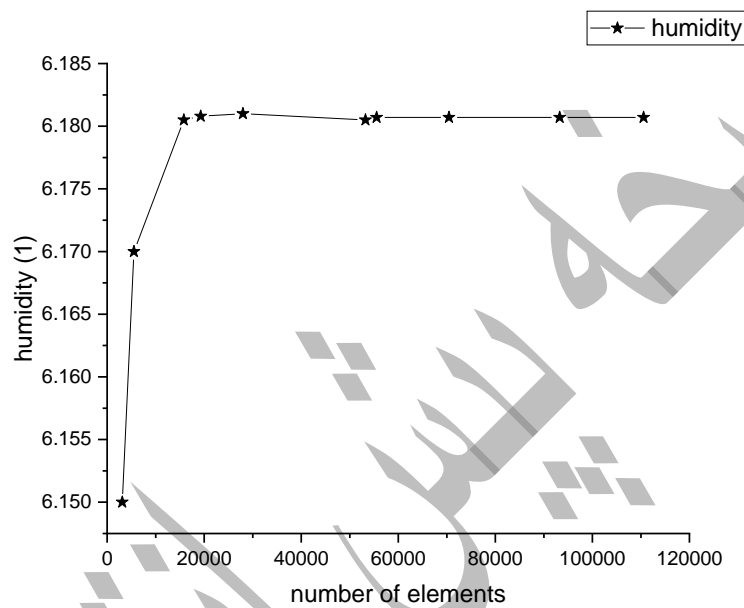
شکل ۲- هندسه یازده مدل ارزیابی شده

۳- استقلال شبکه

نتیجه شبیه سازی مقدار رطوبت متوسط روی شیشه آب شیرین کن خورشیدی با تغییر عدد سلول‌های ایجاد شده از ۵۵۰۰ تا ۱۱۰۵۰۰ سلول مورد ارزیابی قرار گرفت. اجزای متعدد نشان می‌دهد که بعد از ۵۵۰۰۰ سلول دیگر مقدار رطوبت متوسط پس از همگرایی دچار تغییر نمی‌شود. در شکل (۳) می‌توان شبکه بندی و ناحیه محاسباتی را مشاهده نمود. همچنین در شکل (۴) نمودار از مون همگرایی قابل مشاهده است. از این رو در کل ۵۵۵۳۸ سلول ایجاد شد.

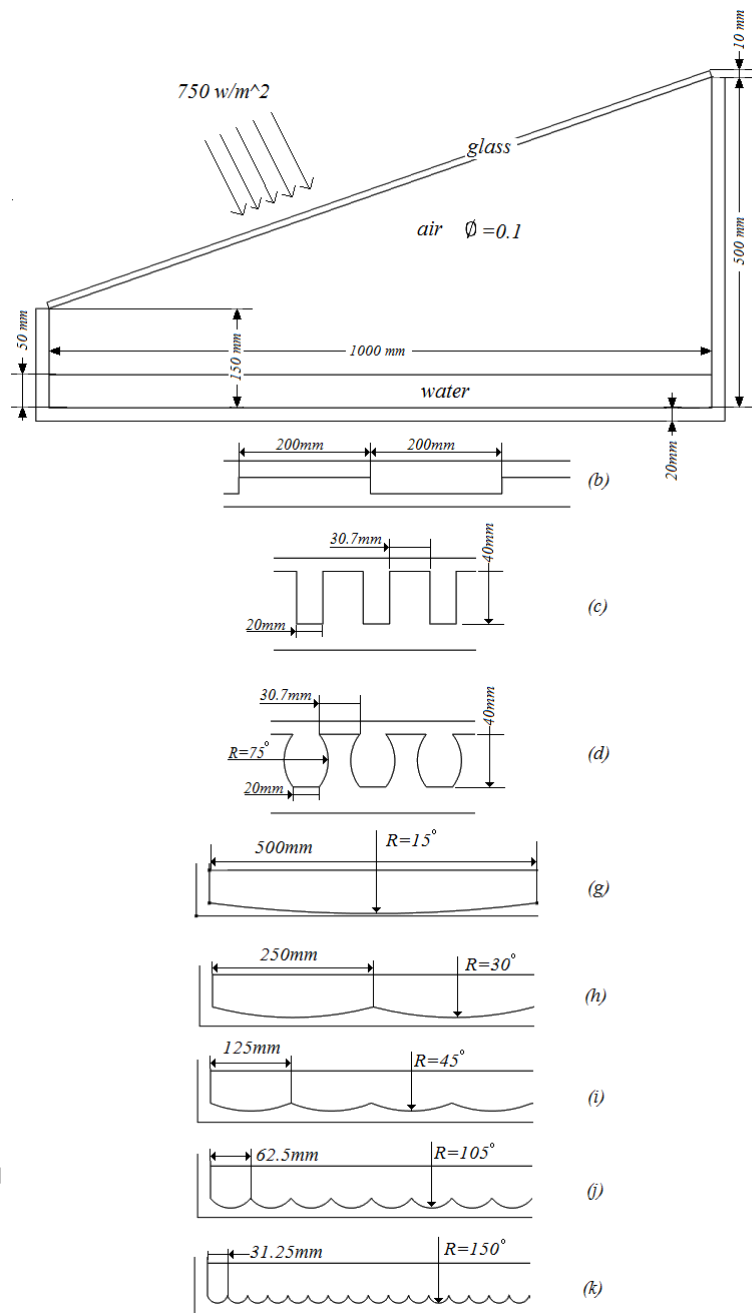


شکل ۳- شبکه بندی و ناحیه محاسباتی



شکل ۴- نمودار آزمون همگرایی رطوبت نسبت به تغییرات سلول

شبهه ساز مورد نظر در چهار بخش حل شده است. بخش اول شامل بخش هیدرودینامیکی مسئله است. که شامل چرخش و خلل و فرج هوای مرطوب و بخار در محفظه آب شیرین کن است. در این بخش جریان به صورت آرام در نظر گرفته شده است. بخش دوم مربوط به بخش انتقال حرارت مسئله می باشد. در این بخش هوای مرطوب و آب به صورت سیال و شیشه و جاذب آب شیرین کن به صورت جامد به نرم افزار معرفی شده اند. همچنین طرف بیرونی شیشه و دیواره‌ها (محیط) شرایط مرزی انتقال حرارت جابجایی و انتقال حرارت تشعشعی با دمای محیط ۳۰۳ کلوین و ضریب انتقال حرارت جابجایی، ۵ وات بر مترمربع کلوین نظر گرفته شده است. بخش سوم حل مسئله شامل بخش تشعشع اعمال شده بر هندسه می باشد. در این بخش از مدل تشعشع External Radiation استفاده شده، دلیل این انتخاب سهولت در مدل سازی مسئله می باشد و شدت تابش خورشیدی اعمال شده بر شیشه برابر با ۷۵۰ وات بر متر مربع می باشد، حل این بخش در مدت زمان ۵ ساعت مورد ارزیابی قرار گرفته چراکه در این زمان خورشید دارای حداکثر توان است، در فصل تابستان در شهر یزد متوسط ساعت وجود افتاب در آسمان حدود ۱۴ ساعت می باشد که برای ارزیابی بهتر در این مسئله این زمان همان گونه که ذکر شد، ۵ ساعت در نظر گرفته شده است. ضریب جذب برای جاذب دستگاه ۰/۹ و برای شیشه ۰/۱ قرار گرفت. بخش چهارم حل مساله شامل بخش هوای مرطوب می باشد در این بخش مقدار اولیه رطوبت در شروع حل برابر با ۰/۱ و ضریب انتقال جرم سطح آب برابر با ۱۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته شده است. در آخر نیز تمامی بخش ها به صورت مولتی فیزیک باهم کوپل شده و حل انجام شد. شرط بوزینسک نیز رعایت شد. در شکل (۵) می توان جزئیات اعمال شده و روش طراحی هندسه‌ها را مشاهده نمود. در جدول (۱) نیز می توان خواص و مصالح به کار رفته در شبهه سازی را مشاهده کرد.



شکل ۵- جزئیات اعمال شده در شبیه سازی

جدول ۱- شرایط مرزی و خواص مواد

مرز ها	ضریب انتقال حرارت هدایتی [$w/m.k$]	c_p [$j/(kg.k)$]	کدورت
شیشه	۱/۳۸	۷۰۳	شفاف
دیواره ها (پشم شیشه)	۰/۰۴۸-۰/۰۳۴	۸۵۰	کدر
آب	۰/۶۹-۰/۵۶	۴۲۵۰-۴۱۵۰	شفاف
هوا	۰/۰۲-۰/۰۳۵	۱۰۰۰-۱۰۲۰	شفاف

۲-معادلات حاکم

معادلات حاکم که شامل معادله بقای جرم، ممنتوم، انرژی و غلظت به شرح معادلات زیر است.

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

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

معادله انرژی نیز به صورت معادله (۳) می باشد

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (3)$$

$$q = -k \nabla T \quad (4)$$

معادله تشعشع نیز به صورت معادله (۵) نوشته می شود.

$$J = \varepsilon e_b(T) + \rho_d G \quad (5)$$

$$G = G_m + G_{amb} + G_{ext} \quad (6)$$

که در معادله (۶) G_{amb} برابر با معادله (۶) است.

$$G_{amb} = F_{amb} \varepsilon_{amb} e_b(T_{amb}) \quad (7)$$

که در معادله (۷) e_b توسط معادله (۸) قابل محاسبه است.

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (8)$$

که در معادله (۸) n ضریب شکست می باشد که در این مقاله برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین σ ضریب استفان بولتزمن است. مدل سازی رطوب و غلظت نیز توسط روابط (۹) محاسبه می باشد.

$$d_z M_v \frac{\partial c_v}{\partial t} + d_z M_v u \cdot \nabla c_v + \nabla \cdot g_w = d_z G \quad (9)$$

که در معادله (۹) g_w توسط معادله (۱۰) قابل محاسبه است.

$$g_w = -d_z M_v D \nabla c_v \quad (10)$$

در معادله (۱۰) c_v توسط معادله (۱۱) نشان داده می شود.

$$c_v = \varphi_w c_{sat} \quad (11)$$

که در معادلات (۱۰ و ۱۱) M_v و φ_w به ترتیب جرم مولی بخار آب و رطوبت نسبی را نشان می دهند. روش های مختلفی برای ضریب انتقال حرارت تبخیر پیشنهاد شده است، معروف ترین آن همبستگی دانکل است [۱۹] که ضریب انتقال حرارت جابجایی در محفظه آب شیرین کن خورشیدی، توسط رابطه (۱۲) بدست آورده می شود.

$$h_{ew} = 0.016273 \times h_{cw} \times \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (12)$$

که در معادله (۱۲) T_w دمای آب و T_g دمای شیشه P_w فشار جزئی بخار در دمای آب و P_g فشار جزئی بخار در دمای شیشه است. h_{cw} نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و آب است که توسط رابطه (۱۳) محاسبه می شود. فشارها نیز توسط روابط (۱۴ و ۱۵) قابل محاسبه می باشند.

$$h_{cw} = 0.884 \times \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \cdot T_w}{268900 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}}$$

(۱۳)

$$P_g = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_g}\right) \quad (۱۴)$$

$$P_w = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_w}\right) \quad (۱۵)$$

علاوه بر این، انتقال حرارت تبخیر را می‌توان به صورت معادله (۱۶) محاسبه کرد. [۲۰]

$$q_{ew} = A_b \times h_{ew} \times (T_w - T_g) \quad (۱۶)$$

بازده ساعتی نیز توسط رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = \frac{q_{ew}}{L} \times 3600 \quad (۱۷)$$

که در رابطه (۱۷) L گرمای نهان تبخیر است و توسط رابطه (۱۸) قابل محاسبه است. [۱۹]

$$L = 2.506 \times 10^6 - 2.369 \times 10^3 T + 0.2678 T^2 - 8.103 \times 10^{-3} T^3 - 2.079 \times 10^{-5} T^4 \quad (۱۸)$$

تولید انرژی آب شیرین کن خورشیدی توسط معادله (۱۹) محاسبه می‌شود. [۱۹]

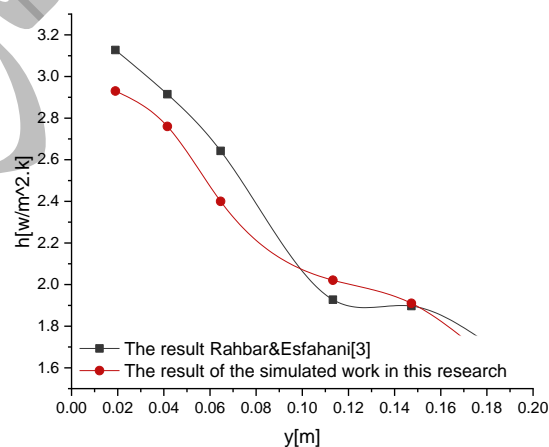
$$Ex_{gen} = \frac{\dot{m}}{3600} \times L \times \left(1 - \frac{T_a}{T_w}\right) \quad (۱۹)$$

و انرژی تبخیر منتقل شده از آب به پوشش شیشه ای توسط معادله (۲۰) بدست می‌آید.

$$Ex_{ew} = A_b \times h_{ew} \times (T_w - T_g) \times \left(1 - \frac{T_a}{T_w}\right) \quad (۲۰)$$

۳- اعتبار سنجی

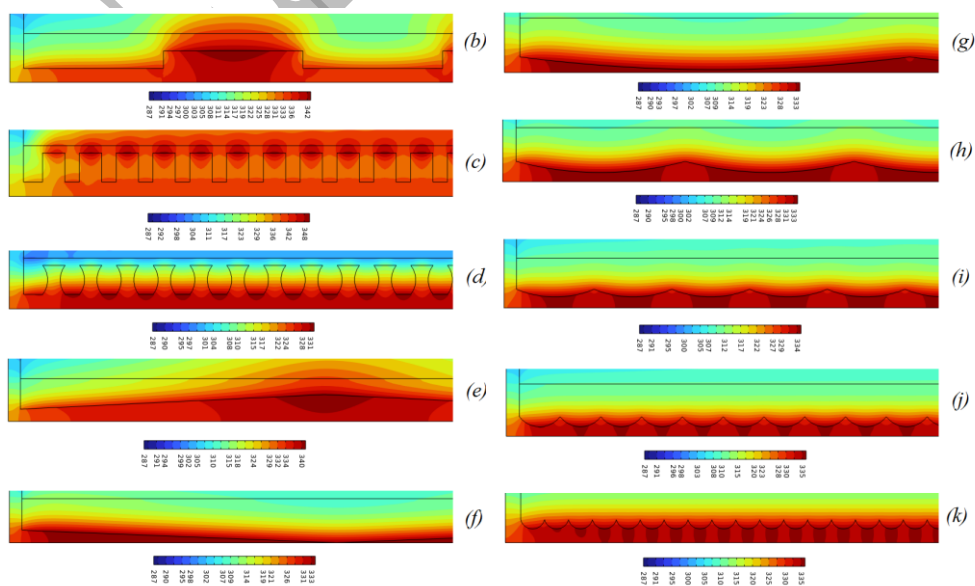
رهبر و اصفهانی [۳] به بررسی برآورد بهره‌وری یک آب شیرین کن ثابت خورشیدی تک شیب به صورت نظری و تحلیل عددی پرداخته‌اند. این پژوهش نیز برای صحت سنجی کار خود، مرجع فوق را با استفاده از نرم افزار کامسول مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه شبیه‌سازی خود را با این مقاله بررسی و مقایسه نمود که در انتها نتایج خوب و قابل قبولی حاصل شد. در شکل (۶) می‌توان نتیجه شبیه‌سازی رهبر و اصفهانی را با نتیجه شبیه‌سازی جهت اعتبار سنجی در این مقاله را مشاهده کرد. حداکثر میزان خطا حدود ۷/۳ درصد می‌باشد.



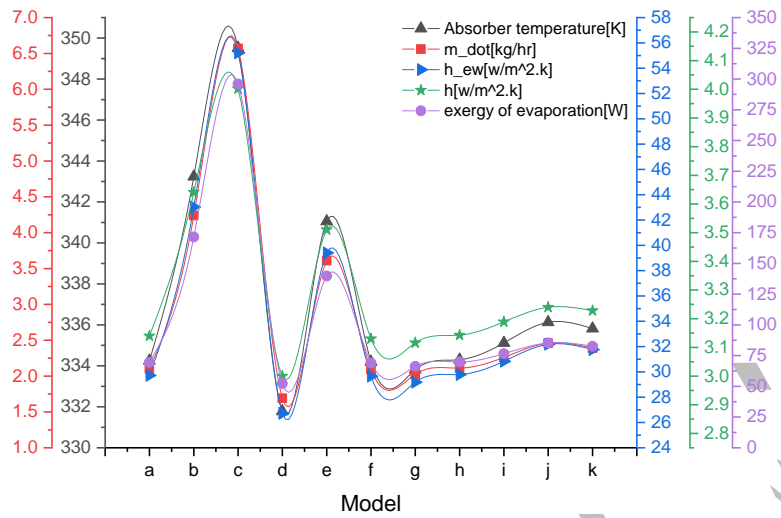
شکل ۶- مقایسه نتایج این پژوهش جهت اعتبار سنجی با کار رهبر و اصفهانی [۳]

۴- نتایج حاصل از شبیه سازی

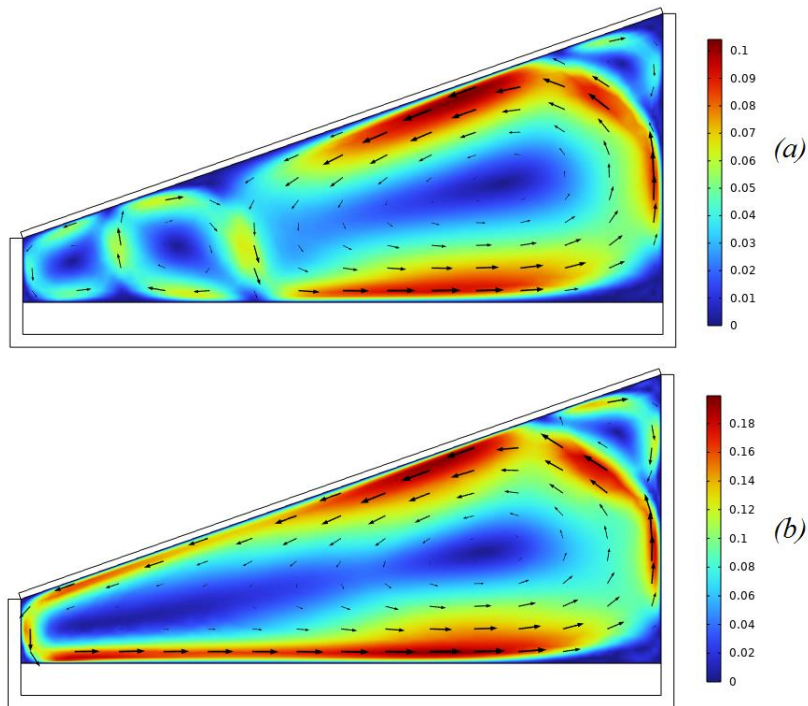
طبق شکل (۵) داده‌ها به نرم افزار وارد شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که هندسه (c) طبق شکل (۲) پس از پایا شدن حل دارای بهترین عمل کرد نسبت به هندسه های دیگر می‌باشد پس از آن بهترین حالت مربوط به هندسه (b) و سپس هندسه (e) و در آخر به ترتیب (از چپ به راست) هندسه های (j,k,l,h,a,f,g,d) است. در سیستم‌های خورشیدی مخصوصا سیستم‌هایی که سر و کار با گرما (نیاز به گرما) دارند طراحی باید به گونه‌ای باشد تا دمای دریافتی از انرژی‌های تجدید پذیر (خورشیدی یا زمین گرمایی) به بالاترین حد خود برسد. در آب شیرین کن‌های خورشیدی واضح است که هرچه جاذب خورشیدی انرژی بیشتر دریافت کند دارای کارایی بالاتری می‌باشد. پس دمای جاذب در بازدهی یک آب شیرین کن خورشیدی نقش به سزایی را ایفا می‌کند. در نتیجه در این پژوهش بهترین حالت متعلق به حالتی می‌باشد که گرمای بیشتری در خود جذب کند، سپس گرمای جذب شده را بیش از بقیه حالت‌های طراحی شده، منتقل کند. در شکل (۷) می‌توان کانتور دما مربوط به حالت‌های طراحی شده برای جاذب خورشیدی مشاهده کرد. در مورد بهترین عملکرد جاذب در این پژوهش حل در حالت پایا و بدون در نظر گرفتن حالت هیدرودینامیکی مسئله انجام شده است. در این شکل کاملا مشخص می‌باشد که بیشترین گرما را حالت (c) جذب و نشر می‌دهد در این حالت دمای جاذب به ۳۴۹ کلوین و دبی جرمی به ۶/۵ کیلوگرم بر ساعت می‌رسد، در ادامه می‌توان کانتورهای مربوط به مدل ساده یعنی (a) را مشاهده کرد. در شکل (۸) می‌توان نمودار مربوط به دمای جاذب و ضریب انتقال حرارت جابجایی درون محفظه آب شیرین کن و بازده ساعتی و انرژی تبخیری، منتقل شده از آب به پوشش شیشه‌ای را برای هر یازده حالت طراحی شده مشاهده نمود. در شکل (۹) کانتور سرعت و نحوه چرخش جریان هوای مربوط را بر حسب متر بر ثانیه ارائه شده است. در شکل (۹) دمای سطح جاذب و آب به واسطه تشعشع خورشیدی زیاد شده و بخار آب به بالا به حرکت در می‌آید و رطوبت را به شیشه می‌رساند، شیشه نیز به واسطه کمتر بودن دمای آن نسبت به سایر نقاط باعث می‌شود بخارات موجود در برخورد با شیشه مایع شود پس از خنک سازی و به واسطه زیاد شدن چگالی به سمت پایین شروع به حرکت نماید. در شکل (۱۰) می‌توان کانتور دما بر حسب کلوین را مشاهده کرد. در شکل (۱۱) می‌توان کانتور رطوبت را مشاهده کرد، در این شکل با توجه به شکل (۱۰) واضح است، نقطه‌ای که دما بیشتر از نقطه دیگر باشد، مقدار رطوبت نیز، بیشتر می‌باشد. در شکل (۱۲) نیز کانتور بخار نسبی را می‌توان مشاهده کرد. در شکل (۱۳) کانتور چگالی قابل مشاهده است. همان گونه که در شکل (۱۳) قابل مشاهده می‌باشد بیشترین چگالی بر روی شیشه به وجود می‌آید و دلیل عدم نمایش میزان چگالی مایع (آب) در شکل (۱۳) اختلاف زیاد بین چگالی بخار و آب است. در شکل (۱۴) نمودار تغییرات دما از سطح آب تا سطح شیشه دقیقا در قسمت وسط هندسه ارائه شده است، قابل توجه است که به واسطه تاخیر دمای شیشه کمتر از نقاط دیگر می‌باشد. در شکل (۱۵) همانند شکل (۱۴) با این تفاوت تغییرات چگالی را می‌توان مشاهده کرد کاملا مشخص می‌باشد و این نمودار کاملا عکس نمودار شکل (۱۴) عمل می‌کند. در شکل (۱۶) نیز تغییرات سرعت در راستای عمود قابل مشاهده می‌باشد و آخر در شکل (۱۷) تغییرات دمای متوسط در شیشه، جاذب، محفظه و آب در طول زمان قابل مشاهده می‌باشد.



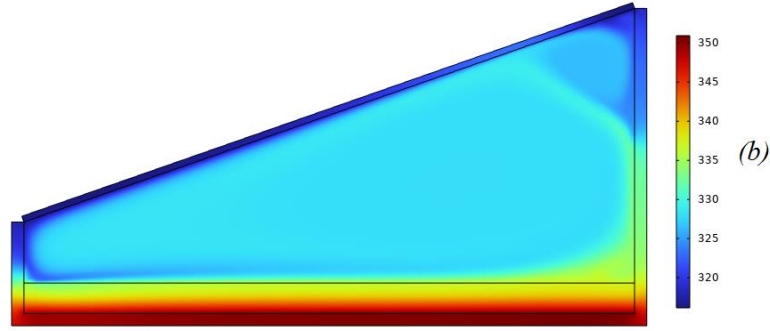
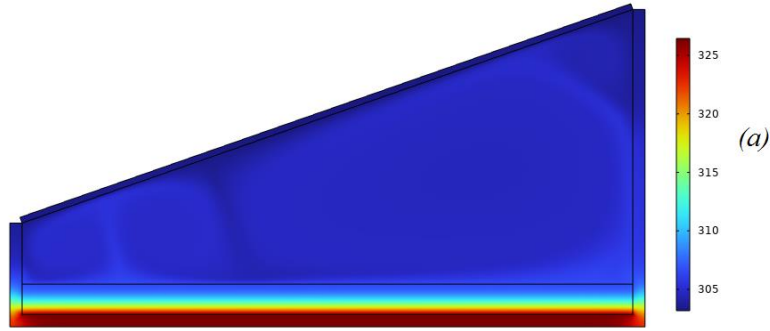
شکل (۷) کانتور دما برای یازده هندسه شبیه سازی شده



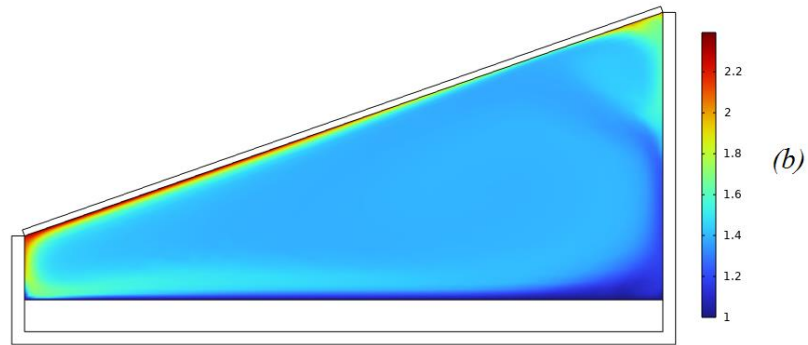
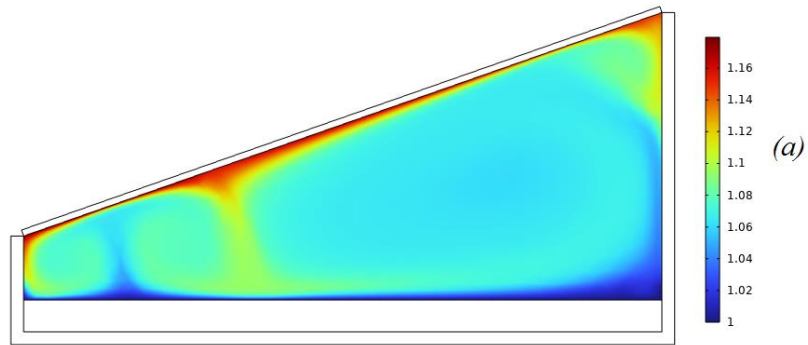
شکل ۸- ضریب انتقال حرارت جابجایی درون محفظه آب شیرین کن و بازده ساعتی و آگزردی تبخیری، منتقل شده از آب به پوشش شیشه ای برای هندسه های رسم شده



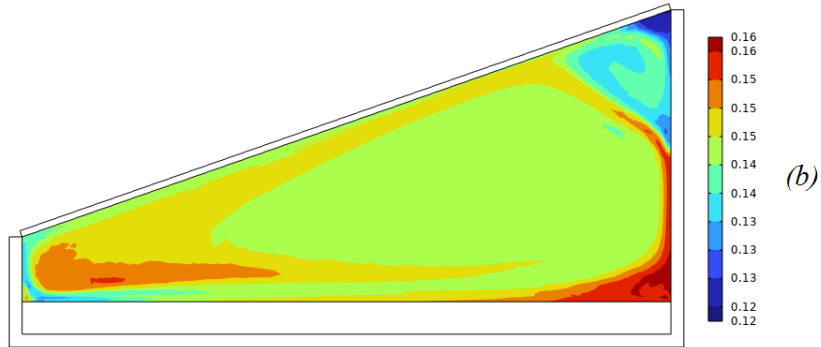
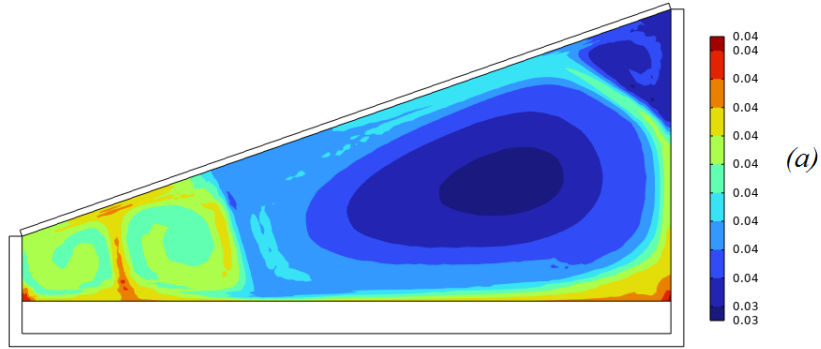
شکل ۹- کانتور سرعت (m/s) (a: در مدت زمان ۱ ساعت و b: در مدت زمان ۵ ساعت)



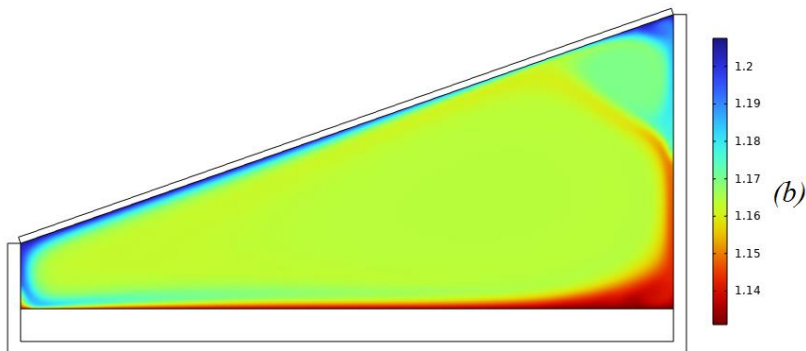
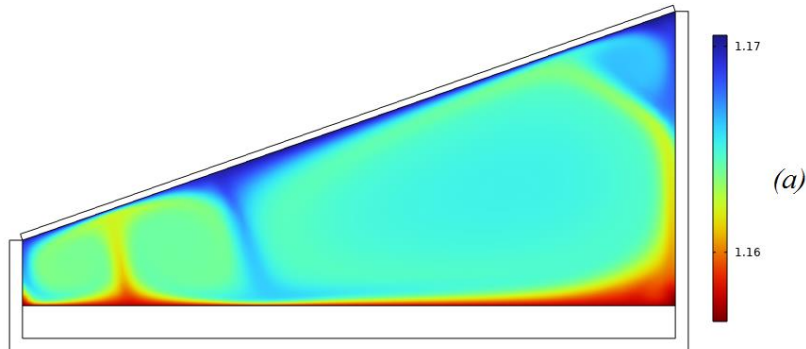
شکل ۱۰- کانتور دما (k) (a: در مدت زمان ۱ ساعت و b: در مدت زمان ۵ ساعت)



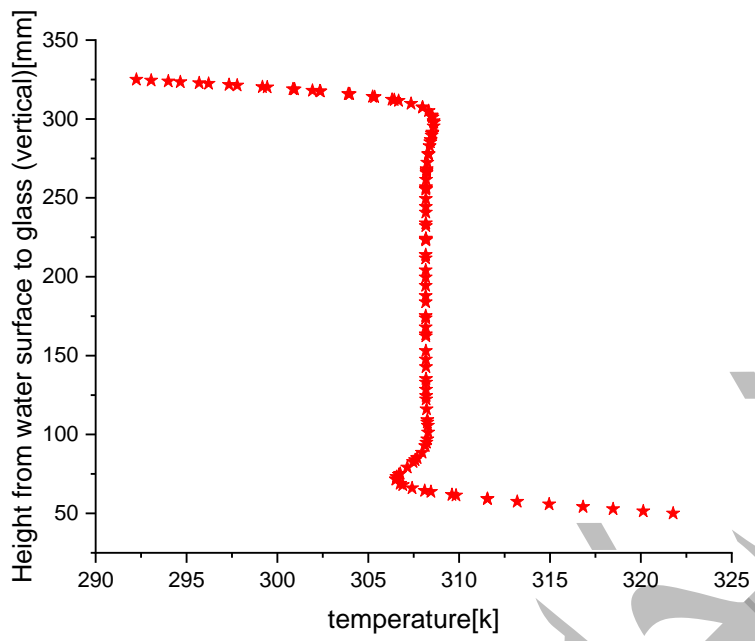
شکل ۱۱- کانتور رطوبت (1) (a: در مدت زمان ۱ ساعت و b: در مدت زمان ۵ ساعت)



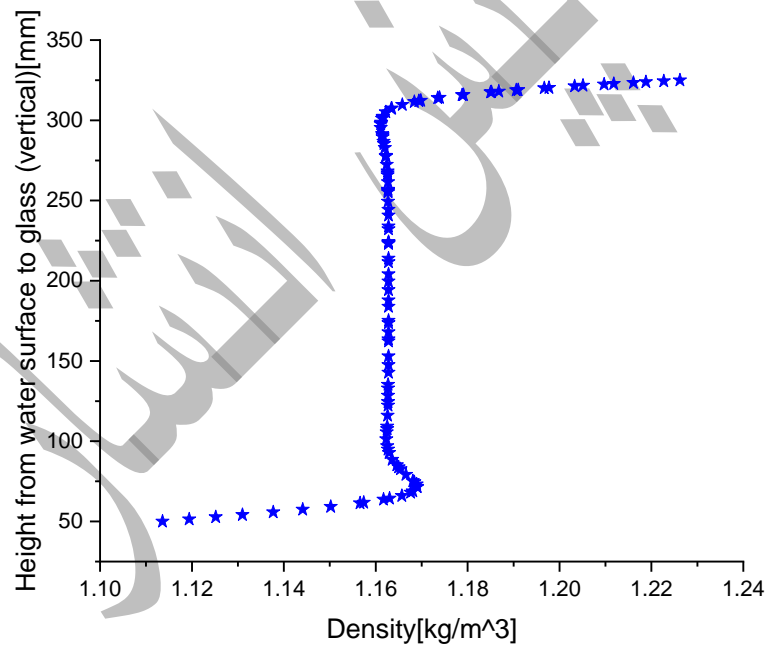
شکل ۱۲- کانتور بخار نسبی (kg/m^3) (a: در مدت زمان ۱ ساعت و b: در مدت زمان ۵ ساعت)



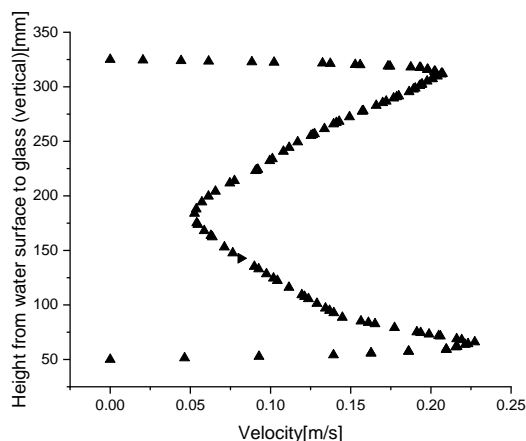
شکل ۱۳- کانتور چگالی (kg/m^3) (a: در مدت زمان ۱ ساعت و b: در مدت زمان ۵ ساعت)



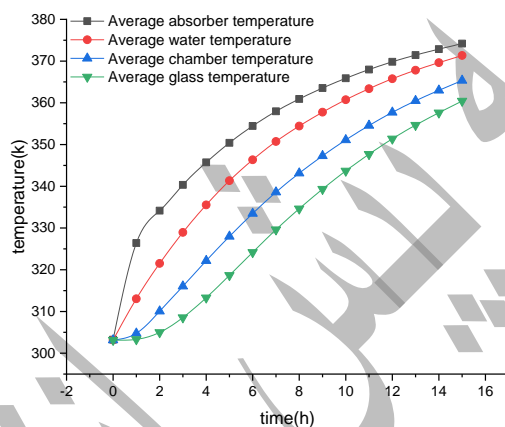
شکل ۱۴- نمودار تغییرات دما از سطح آب تا شیشه



شکل ۱۵- نمودار تغییرات چگالی از سطح آب تا شیشه



شکل ۱۶- نمودار تغییرات سرعت از سطح آب تا شیشه



شکل ۱۷- تغییرات دما نسبت به زمان

۵- نتیجه گیری

آب شیرین کن خورشیدی به واحد شیرین سازی آب شوری گفته می‌شود که انرژی مورد نیاز برای شیرین سازی آب را از خورشید تأمین می‌کند فرآیندهای تجاری شیرین سازی آب شور به فرایندهای حرارتی و اسمز معکوس محدود می‌شوند در فرایند حرارتی از انرژی حرارتی برای تبخیر آب شور استفاده می‌شود، میعان آب بخار حاصل از فرایند تبخیر منجر به تولید آب شیرین می‌شود. در این پژوهش یک آب شیرین کن خورشیدی تک‌شیب در حالت دائم و شرایط هیدرودینامیکی آرام در یازده هندسه مختلف با شرایط کاملاً یکسان مورد ارزیابی عدد قرار گرفت. هدف از انجام این پژوهش شناسایی بهترین هندسه برای طراحی سطح جاذب آب شیرین کن خورشیدی بود زیرا که یکی از مهم ترین عوامل برای طراحی و بالا بردن بازده آب شیرین کن، سطح جاذب آن می‌باشد بایستی زمینه‌ای را فراهم نمود که انرژی خورشیدی در قسمت جاذب به شکل مطلوبی جذب شود. همانطور که مشاهده شد هندسه (c) پس از پایا شدن حل دارای بهترین عمل کرد می‌باشد زیرا در این حالت بدلیل وجود پره های متعدد در جاذب باعث جذب انرژی بیشتری شده و در نتیجه دمای جاذب، هنگام قرار گیری در مقابل تابش ۷۵۰ وات بر متر مربع به ۳۴۹ کلوین می‌رسد. این امر باعث بالارفتن تبخیر و در نهایت بازده بیشتر می‌شود، که در این حالت دبی جرمی ۶/۵ کیلوگرم بر ساعت است. پس از آن بهترین حالت مربوط به هندسه (b) که در این حالت دمای جاذب به ۳۴۳ کلوین و دبی جرمی ۴/۲۵ کیلوگرم بر ساعت و سپس هندسه (e) که دمای جاذب در این هندسه به ۳۴۱ کلوین و دبی جرمی ۳/۷۵ کیلوگرم بر ساعت و در آخر هندسه (d) می‌باشد که در این حالت دمای جاذب به ۳۳۱ کلوین و دبی جرمی ۱/۵ کیلوگرم بر ساعت است. از این رو می‌توان برای طراحی از مدل (c) استفاده کرد و در صورت صرفه جویی در هزینه‌ها می‌توان از نمونه ساده‌تر یعنی (b) استفاده بهینه کرد.

- [1] Jahanshahi, E., Hosseinkhani, A. and Moahmmadi, S.M.H., 2017. Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), pp.239-248
- [2] Qiblawey, H.M. and Banat, F., 2008. Solar thermal desalination technologies *Desalination*. Volume, 220, pp.1-3..
- [3] Rahbar, N. and Esfahani, J.A., 2013. Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis. *Energy*, 49, pp.289-297.
- [4] Sonawane, C., Alrubaie, A.J., Panchal, H., Chamkha, A.J., Jaber, M.M., Oza, A.D., Zahmatkesh, S., Burduhos-Nergis, D.D. and Burduhos-Nergis, D.P., 2022. Investigation on the impact of different absorber materials in solar still using CFD simulation—economic and environmental analysis. *Water*, 14(19), p.3031.
- [5] Almeshaal, M.A. and Maatki, C., 2022. Numerical Study of Inclination Effect of the Floating Solar Still Fitted with a Baffle in 3D Double Diffusive Natural Convection. *Processes*, 10(8), p.1607.
- [6] Mittal, G., 2021. An unsteady CFD modelling of a single slope solar still. *Materials Today: Proceedings*, 46, pp.10991-10995.
- [7] Prakash, O., Ahmad, A., Kumar, A., Hasnain, S.M. and Kumar, G., 2022. Comprehensive analysis of design software application in solar distillation units. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, pp.171-180.
- [8] Keshtkar, M., Eslami, M. and Jafarpur, K., 2020. A novel procedure for transient CFD modeling of basin solar stills: Coupling of species and energy equations. *Desalination*, 481, p.114350.
- [9] S. El-Sebaey, M., Ellman, A., Hegazy, A. and Ghonim, T., 2020. Experimental analysis and CFD modeling for conventional basin-type solar still. *Energies*, 13(21), p.5734.
- [10] Suraparaju, S.K., Dhanusuraman, R. and Natarajan, S.K., 2021. Performance evaluation of single slope solar still with novel pond fibres. *Process Safety and Environmental Protection*, 154, pp.142-154.
- [11] Singh, A.K., Singh, D.B., Dwivedi, V.K., Tiwari, G.N. and Gupta, A., 2020. Water purification using solar still with/without nano-fluid: a review. *Materials Today: Proceedings*, 21, pp.1700-1706.
- [12] Radomska, E., Mika, Ł., Sztekler, K., Kalawa, W., Lis, Ł., Pielichowska, K., Szumera, M. and Rutkowski, P., 2023. Experimental and Theoretical Investigation of Single-Slope Passive Solar Still with Phase-Change Materials. *Energies*, 16(3), p.1188.
- [13] Athamena, K., Sini, J.F., Rosant, J.M. and Guilhot, J., 2018. Numerical coupling model to compute the microclimate parameters inside a street canyon: Part I: methodology and experimental validation of surface temperature. *Solar Energy*, 174, pp.1237-1251.
- [14] Jahanpanah, M., Sadatinejad, S.J., Kasaeian, A., Jahangir, M.H. and Sarrafha, H., 2021. Experimental investigation of the effects of low-temperature phase change material on single-slope solar still. *Desalination*, 499, p.114799.
- [15] Kumar, S. and Prakash, O., 2022. Improving the Single-Slope Solar Still Performance Using Solar Air Heater with Phase Change Materials. *Energies*, 15(21), p.8013.
- [16] Alawee, W.H., Abdullah, A.S., Mohammed, S.A., Majdi, A., Omara, Z.M. and Younes, M.M., 2022. Testing a single slope solar still with copper heating coil, external condenser, and phase change material. *Journal of Energy Storage*, 56, p.106030.

- [17] Katekar, V.P. and Deshmukh, S.S., 2020. A review of the use of phase change materials on performance of solar stills. *Journal of Energy Storage*, 30, p.101398.
- [18] Aly, W.I., Tolba, M.A. and Abdelmagied, M., 2023. Experimental investigation and performance evaluation of an oval tubular solar still with phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 221, p.119628.
- [19] Shoeibi, S., Rahbar, N., Esfahlani, A.A. and Kargarsharifabad, H., 2021. Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of air-cooled and water-cooled solar still: Experimental investigation and numerical simulation. *Renewable Energy*, 171, pp.227-244.
- [20] Kumar, S., Dubey, A. and Tiwari, G.N., 2014. A solar still augmented with an evacuated tube collector in forced mode. *Desalination*, 347, pp.15-24.

