

شبیه‌سازی آب شیرین‌کن خورشیدی دوطرفه همراه با بازتابنده‌ی خارجی چرخان

محمدرضا عساری* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول

صفورا کریمی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی شیعی، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول

محسن پرویز (کارشناس ارشد)

مرکز پژوهشی جندی‌شاپور، دزفول

نرگس صادقیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور، دزفول

مهندسی مکانیک شریف، پاییز ۱۴۰۰ (دوره‌ی ۳-۳، شماره‌ی ۲، ص. ۲۸-۳۱، پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر آب شیرین‌کن خورشیدی دوطرفه همراه با بازتابنده‌ی خارجی چرخان، که در آن تابش خورشید به کف حوضچه‌ی متمرکز و در نتیجه میزان بهره‌وری افزایش یافته، شبیه‌سازی شده است. برای این منظور معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و جرم با در نظر گرفتن فرضیات سیال هوای مرطوب تکفاز، جابه‌جایی طبیعی آرام، پایا و دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار کامسول حل شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای دو زاویه‌ی اولیه با نتایج آزمایشگاهی انجام شده در تاریخ ۲۰ آبان ماه سال ۱۳۹۶ برای شرایط آب و هوایی دزفول با طول و عرض جغرافیایی ۴۸/۳۶ و ۳۲/۴۲ درجه واقع در جنوب غربی ایران نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین آنها وجود دارد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده‌ی خارجی، دمای آب و شیشه را به ترتیب ۷ و ۴ درصد افزایش می‌دهد. همچنین عدد ناسلت به میزان ۵ درصد کاهش یافته که موجب افزایش میزان بهره‌وری تا حدود ۳۲ درصد شده است.

واژگان کلیدی: آب شیرین‌کن خورشیدی، بهره‌وری، بازتابنده‌ی خارجی چرخان، شبیه‌سازی.

۱. مقدمه

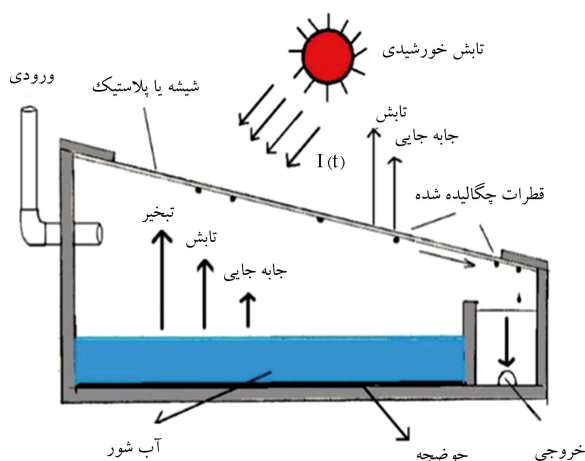
امروزه دسترسی به آب آشامیدنی یکی از موضوعات اساسی برای زندگی انسان است.^[۱] و دستگاه‌های آب شیرین‌کن در تأمین آب مورد نیاز جوامع نقش به‌سزایی دارند. با توجه به افزایش مصرف آب و کاهش منابع طبیعی آب شیرین، این نقش روز به روز پررنگ‌تر می‌شود. از طرفی انرژی خورشیدی به دلایلی نظیر فراوانی، در دسترس بودن، پاک بودن، دوست‌دار محیط زیست و قابلیت تبدیل به انرژی‌های حرارتی و الکتریکی، منبعی مهم برای تصفیه‌ی آب به شمار می‌رود.^[۲] از این رو چنانچه منطقه‌ی از لحاظ تابش خورشیدی غنی باشد، آب شیرین‌کن خورشیدی گزینه‌ی مناسبی برای شیرین‌سازی آب‌های شور است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، آب شیرین‌کن خورشیدی دستگاه ساده‌ی است که جاذب تابش خورشید است و به‌طور هم‌زمان انرژی خورشیدی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند که سبب تبخیر آب درون حوضچه‌ی آب شیرین‌کن می‌شود. بخار ایجاد شده در بخش سرد داخل

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۷/۷/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۲/۲۳/۱۳۹۹، پذیرش ۲۴/۴/۱۴۰۰.

DOI:10.24200/J40.2021.56805.1564

پوشش شیشه‌ی تقطیر شده و درون محفظه‌ی جمع‌آوری می‌شود.^[۳] بنابراین تقطیر خورشیدی شامل سه فرایند انتقال حرارت، جابه‌جایی آزاد و تشعشع است. مسیر انتقال حرارت بدین ترتیب است که گرما از طریق تشعشع خورشید به آب شیرین‌کن خورشیدی جریان می‌یابد و سپس به‌وسیله‌ی جابه‌جایی از حوضچه به آب، از بخار به پوشش شیشه‌ی و از پوشش شیشه‌ی به محیط منتقل می‌شود. همچنین انتقال حرارت از داخل آب شیرین‌کن خورشیدی به محیط اطراف از طریق پوشش شیشه‌ی شفاف و دیواره‌ها جریان می‌یابد.^[۴] اشکال مختلفی از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نظیر حوضچه‌ی، لوله‌ی، کروی، هرمی و... وجود دارد. آب شیرین‌کن‌های حوضچه‌ی در دو نوع یکطرفه و دوطرفه هستند که به دلیل سطح افقی آب درون حوضچه، برخورد کمتری با اشعه‌های خورشید دارند و در نتیجه میزان بهره‌وری آنها اندک است. اما با روش‌هایی نظیر استفاده از بازتابنده‌های داخلی و خارجی، همچنین استفاده از مواد جاذب در کف حوضچه می‌توان عملکرد آنها را بهبود بخشید. محققان به‌منظور تجزیه و تحلیل و بهره‌وری بیشتر از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، از دو روش تجربی و شبیه‌سازی عددی استفاده می‌کنند که خود به دو روش تحلیل نظری و دینامیک



شکل ۱. نمایی شماتیک از آب شیرین‌کن خورشیدی [۳].

وجود، نصب بازتابنده‌های داخلی روی دیواره‌ی عقب، بازده آب شیرین‌کن را ۲۲ درصد در طول سال افزایش می‌دهد. همچنین نصب بازتابنده‌های داخلی روی تمام دیواره‌ها در مقایسه با آب شیرین‌کن بدون بازتابنده‌ی داخلی می‌تواند میزان تقطیر را در زمستان، تابستان و کل سال به ترتیب ۶۵، ۲۲ و ۳۴ درصد افزایش دهد.

بررسی تحولات عددی در آب شیرین‌کن خورشیدی [۱۲] نشان داد که در آب شیرین‌کن یکطرفه شیب بازتابنده‌ی خارجی باید در تابستان رو به عقب و در سایر فصول رو به جلو باشد. همچنین عمق آب، سرعت جریان، ضخامت و جرم آب اثر معکوسی بر میزان بهره‌وری دارد و ضخامت عایق در محفظه‌ی مستطیلی کف حوضچه بر میزان بهره‌وری تأثیر ناچیزی دارد. در آب شیرین‌کن دوطرفه عمق آب، ظرفیت و جنس مواد استفاده شده در دیواره‌های جانبی آب شیرین‌کن بر نرخ تولید اثرگذارند و جهت‌گیری شمال به جنوب عملکرد بالاتری نسبت به شرقی غربی دارد. زاویه‌ی آینه نسبت به قائم باید به ترتیب در تابستان ۱۰° و در زمستان ۰° درجه باشد.

طی پژوهشی دیگر [۱۳] عملکرد آب شیرین‌کن دوطرفه‌ی تک‌حوضچه‌یی با/بدون مواد تغییر فاز دهنده، اثر بازتابنده‌ها و فین‌ها بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، بازده آب شیرین‌کن ساده ۱۴/۳۶ درصد بود که با استفاده از فقط پوشش سیاه به ۱۷/۱۷ درصد رسید. همچنین با استفاده از پوشش سیاه و بازتابنده‌ها و مواد تغییر فاز دهنده به ترتیب افزایش ۲۴/۴۳ و ۴۰/۵۳ درصدی در بازده مشاهده شد. در تحقیقی دیگر [۱۴] محققان با انجام آزمایشی بر آب شیرین‌کن خورشیدی معمولی که با استفاده از بازتابنده‌ها، پارچه‌ی کفنی و زاویه‌ی شیشه، اصلاح شده بود و مقایسه‌ی نتایج با آب شیرین‌کن معمولی دریافتند که با ترکیب همه‌ی این اصلاحات، تولید آب و بازده آب شیرین‌کن اصلاح شده به ترتیب ۷۲/۱۸ و ۴۱/۵ درصد از نوع معمولی خود بیشتر است. طی آزمایشی دیگر بر آب شیرین‌کن شیب‌دار [۱۵] با اعمال تغییراتی نظیر نصب میله‌های زاویه‌دار روی حوضچه، ساخت حوضچه با زاویه‌ی شیب قابل تنظیم، نصب بازتابنده‌ی خارجی مسطح در بالا و پایین و سیستم خنک‌کننده روی پوشش شیشه‌یی در شرایط آب و هوایی تهران در طول تابستان، زمستان و بهار، محققان دریافتند که با اعمال تنها یک تغییر، عبور سیستم خنک‌کننده روی پوشش شیشه‌یی بیشترین تأثیر را بر افزایش میزان بهره‌وری در بهار دارد و نیز استفاده از بازتابنده در زاویه‌ی شیب بهینه، بهترین نتایج را در زمستان خواهد داشت. در ادامه، محققان طی آزمایشی با استفاده از مواد ذخیره‌ساز گرما در حوضچه با تمرکز تابش خورشیدی روی آب شیرین‌کن به کمک بازتابنده‌ی خارجی [۱۶] تلاش کردند میزان بهره‌وری آب شیرین‌کن را افزایش دهند. آنها برای این مطالعه، سه عدد آب شیرین‌کن خورشیدی به صورت معمولی، با مواد ذخیره‌ساز گرما و با بازتابنده‌ی خارجی در ابعاد یکسان را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که میزان بهره‌وری آب شیرین‌کن با مواد ذخیره‌ساز ۲۳/۰۸ درصد بالاتر از آب شیرین‌کن معمولی است در حالی که آب شیرین‌کن همراه بازتابنده‌ها ۶۲/۹۷ درصد بوده است. در بررسی آب شیرین‌کن خورشیدی دوطرفه همراه با بازتابنده‌های خارجی چرخان از پایین به صورت تجربی در دو حالت ثابت و چرخان [۱۷] محققان دریافتند که مقدار آب مقطر تولیدی حالت چرخان نسبت به حالت ثابت حدود ۶۴ درصد افزایش داشته است و بهره‌وری دو حالت چرخان و ثابت در دو روز با هوای نسبتاً ابری به ترتیب ۴۷ و ۵۳ درصد نسبت به هوای آفتابی کاهش داشته است. در مطالعه‌ی دیگر و با استفاده از نرم‌افزار کامسول برای حل معادلات انتقال حرارت و جرم یک سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی دوزنقه‌یی [۱۸] پژوهشگران دریافتند که توزیع دما و تولید آب پیش‌بینی شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد. همچنین برای تولید کل، انحراف از داده‌های تجربی کمتر از ۷ درصد بوده است. بررسی تجربی و عددی آب شیرین‌کن یک طرفه [۱۹] با هدف توزیع دمای درون آب شیرین‌کن (در بررسی عددی)، نشان

سیالات محاسباتی تقسیم‌بندی می‌شود. روش «دینامیک سیالات محاسباتی» به دلیل مزایایی مانند شبیه‌سازی شرایط واقعی و ایده‌آل، سرعت بالای دستیابی به نتایج، حل مسائل وابسته به زمان در حالات مختلف، هزینه‌ی پایین، همچنین بررسی سیستم‌هایی که انجام آزمایش روی آنها دشوار و پرهزینه است، از جایگاه ویژه‌یی برخوردار است [۵].

تحقیقات تجربی و عددی متعددی در مورد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی همراه با بازتابنده‌ها انجام شده است. بررسی آب شیرین‌کن خورشیدی یکطرفه با آینه‌های نصب شده بر دیواره‌های جانبی آن [۶] نشان داد که استفاده از آینه‌ها باعث افزایش میزان بهره‌وری در تمام طول روز می‌شود. همچنین استفاده از آینه‌های خارجی برای بررسی عملکرد آب شیرین‌کن دوطرفه‌ی حوضچه‌یی [۷] نشان داد که میزان تابش روی آب شیرین‌کن افزایش قابل توجهی داشته است؛ همچنین میزان بهره‌وری روزانه‌ی آب شیرین‌کن با آینه در تابستان و زمستان به ترتیب حدود ۱۹ و ۳۰ درصد بالاتر از بدون آینه است که این به علت افزایش دمای آب حوضچه و اختلاف دمای آب و شیشه است. محققان در پژوهشی دیگر که به منظور یافتن اثرات بازتابنده‌ی داخلی روی دیواره‌های داخلی و جانبی آب شیرین‌کن یکطرفه به صورت تجربی و عددی انجام شد [۸] دریافتند که میزان بهره‌وری با نصب بازتابنده‌ها در زمستان ۸۲/۶ درصد و در تابستان ۲۲ درصد افزایش یافته است. تاناکا [۹] اثرات بازتابنده‌های داخلی و خارجی روی آب شیرین‌کن حوضچه‌یی یکطرفه را به صورت عددی مورد بررسی قرار داد و دریافت که مقدار روزانه‌ی آب شیرین را می‌توان با خمیدگی بازتابنده‌ی خارجی در تابستان و بازتابنده‌ی جلویی در فصل‌های دیگر افزایش داد؛ همچنین زاویه‌ی بهینه‌ی بازتابنده‌ی خارجی، برای زاویه‌ی سرپوش ۱۰° تا ۵۰° درجه را به دست آورد و به این نتیجه رسید که افزایش مقدار متوسط روزانه‌ی تقطیر در طول سال برای این نوع آب شیرین‌کن با زاویه‌های سرپوش ۱۰°، ۳۰° و ۵۰° درجه نسبت به نوع بدون بازتابنده‌ی آن به ترتیب برابر ۲۹، ۴۳ و ۶۷ درصد است. نتایج حاصل از یک بررسی تجربی و عددی [۱۰] در زمستان بر روی آب شیرین‌کن دوطرفه همراه با بازتابنده‌های خارجی نشان داد که بازتابنده‌های خارجی میزان بهره‌وری را تقریباً ۸۲ درصد افزایش داده‌اند. اثرات بازتابنده‌های داخلی در میزان بهره‌وری آب شیرین‌کن یک طرفه به صورت تجربی و عددی بررسی شد [۱۱] و پس از تأیید مدل با داده‌های تجربی، عملکرد آب شیرین‌کن با و بدون بازتابنده‌ی داخلی روی دیواره‌های مختلف ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده‌ی هم‌زمان از بازتابنده‌های داخلی در دیواره‌های جلو و اطراف موجب افزایش ۱۸ درصدی بازده‌ی آب شیرین‌کن می‌شود، با این

اتلاف گرانی (ویسکوزیته) نیز صرف نظر شده است. انتقال حرارت جابه جایی آزاد درون آب شیرین کن به علت بخار ایجاد شده روی سطح آب در حالت اشباع رخ می دهد. همچنین فرض شده است که دیواره های جانبی آدیاباتیک هستند و شرط عدم لغزش در تمام آنها صادق است.^[۱۱] سطح شیشه تحت تابش خورشید و سطح آب تحت تابش بازتابنده های خارجی چرخان است. برای جریان جابه جایی طبیعی پایدار، آرام، دو بعدی و همچنین سیال تراکمناپذیر معادلات بقای پیوستگی، مومنتوم، انرژی و غلظت به صورت بی بعد چنین بیان می شوند:^[۱۲]

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{-\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{-\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ra \text{Pr} (\theta + BrC) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (4)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial X} + V \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{1}{Le} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \right) \quad (5)$$

که متغیرهای بی بعد در آن مطابق رابطه ۶ معرفی می شوند:

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, V = \frac{vH}{\nu}, U = \frac{uH}{\nu} \quad (6)$$

$$P = \frac{pH^3}{\rho\nu^2}, \theta = \frac{T-T_g}{T_w-T_g}, C = \frac{c-c_g}{c_w-c_g}$$

همچنین پارامترهای بی بعد که در معادلات بالا ظاهر می شوند، نظیر عدد پرانتل و عدد رایلی (Pr)، عدد لوییس (Le) و نسبت بویانسی (Br) به ترتیب، چنین تعریف شده اند:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, Ra = \frac{g\beta_l(T_w-T_g)H^3}{\alpha\nu}, \quad (7)$$

$$Le = \frac{\alpha}{D}, Br = \frac{\beta_c(C_w-C_g)}{\beta_l(T_w-T_g)}$$

با توجه به این که سیال مورد مطالعه هوای مرطوب است، اعداد پرانتل و لوییس در محدوده های $(0.7, 0.7)$ (Pr) و $(0.9, 1.0)$ (Le) هستند. همچنین $H = (H_r + H_1)/2$ که ارتفاع متوسط درون آب شیرین کن است به صورت $H = (H_r + H_1)/2$ تعریف می شود. به منظور محاسبه میانگین عدد ناسلت بی بعد، از رابطه $\bar{Nu} = \int_0^1 (\partial\theta/\partial n)|_{water} dx$ که توسط پژوهشگران^[۱۲] ارائه شده، استفاده شد. شرایط مرزی اعمال شده برای حل عبارت اند از:

• پوشش شیشه ای شیب دار:

$$U = V = 0, q_{rad} = h_r A_s (\theta_s - \theta_{amb}), C = 0$$

• دیواره های جانبی:

$$U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

• سطح آب شور:

$$U = V = 0, q = A \cdot \sin(\varphi), m_{ev} = \frac{q}{27454 \times 10^6 \times 18}$$

لازم به ذکر است برای اعمال شرط مرزی به کف حوضچه از طریق بازتابنده ی خارجی چرخان از فلاکس حرارتی q استفاده شده است که ضریب A نشان دهنده ی

داد که دمای آب شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد و دینامیک سیالات محاسباتی نیز یک ابزار قوی برای تحلیل طراحی آب شیرین کن است.

چنان که مطالعات نشان می دهند آب شیرین کن خورشیدی همراه با بازتابنده ها به دلیل متمرکز کردن تابش خورشید بر کف حوضچه و افزایش دمای آن به ارتفاع میزان بهره وری میانجامد. از طرفی تاکنون آب شیرین کن خورشیدی دوطرفه همراه با بازتابنده ی خارجی چرخان از پایین به کف حوضچه در بازه های زمانی کوتاه به صورت عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که مطالعات انجام شده^[۲۰] نشان دهنده ی اهمیت نرم افزارهایی چون متلب، انسیس، فلوئنت و نظیر آنها در تجزیه و تحلیل شبیه سازی آب شیرین کن خورشیدی در مقایسه با کارهای آزمایشگاهی است. لذا در این تحقیق به شبیه سازی جریان سیال، انتقال حرارت و جرم در یک آب شیرین کن خورشیدی دوطرفه پرداخته ایم و تأثیر چرخش بازتابنده به کف حوضچه در ساعات مختلف روز را مورد بررسی قرار داده ایم.

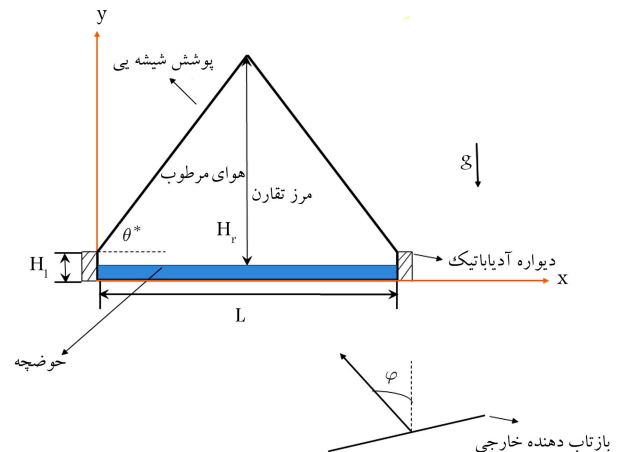
۲. بیان مسئله

۲.۱. شرح فیزیک مسئله

جزئیات و ابعاد هندسه ی آب شیرین کن خورشیدی شبیه سازی شده در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. ابعاد و اندازه های ارائه شده، مطابق مطالعات پیشین^[۱۷] و به منظور اعتبارسنجی نتایج طراحی شده است. چنان که مشاهده می شود، آب شیرین کن را دو بعدی در نظر گرفته ایم و نیز به دلیل متقارن بودن هندسه، مدل به صورت نیمه ایجاد شده و از شرط مرزی تقارن برای آن استفاده شده است.

۲.۲. معادلات حاکم

در این تحقیق هوای داخل محفظه ی آب شیرین کن اشباع و مدل گاز ایده آل تراکم ناپذیر با خواص فیزیکی ثابت به منظور محاسبه ی تغییرات دانسیته در نظر گرفته شده و از



شکل ۲. هندسه ی آب شیرین کن خورشیدی شبیه سازی شده.

جدول ۱. ابعاد آب شیرین کن خورشیدی شبیه سازی شده.

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۳۰	H_1 (mm)	۳۴۷	L (mm)
۴۵ درجه	θ^* (deg)	۲۰۳/۵	H_r (mm)

جدول ۲. روابط مربوط به کمیت‌های فیزیکی هوای مرطوب وابسته به درجه حرارت. [۲۳]

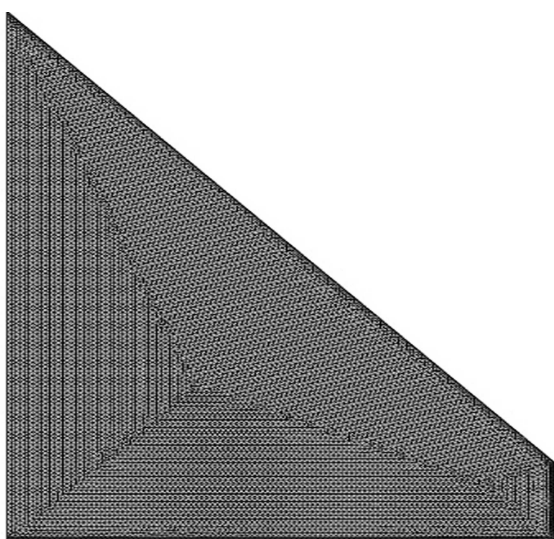
کمیت	رابطه
ظرفیت گرمایی ویژه	$C_p = 999.2 + 0.1434 \times T_i$
دانشیه	$\rho = 353.44 / (T_i + 273.15)$
ضریب هدایت حرارتی	$k = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} \times T_i$
لزجت دینامیکی	$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8} \times T_i$
گرمای نهان تبخیر بخار آب	$h_{fg} = \begin{cases} 2,2615 \times 10^6 \times \left[1 - (7.616 \times 10^{-4} \times T_i) \right] & T_i > 70 \\ 2,4935 \times 10^6 \times \left[1 - \left(\frac{9.4749 \times 10^{-4} \times T_i}{+1.3132 \times 10^{-7} \times T_i^2} - 4.7947 \times 10^{-9} \times T_i^3 \right) \right] & T_i < 70 \end{cases}$
ضریب انبساط حرارتی	$\beta_t = 1 / (T_i + 273)$
ضریب انبساط اجزا	$\beta_c = \frac{1}{\rho} \left[\frac{M_a}{M_v} - 1 \right] \cong 0.0513$
متوسط دمای آب و شیشه	$T_i = (T_g + T_w) / 2$

۳. حل عددی

۱.۳. روند حل عددی

معادلات حاکم بر جریان سیال در این شبیه‌سازی شامل بقای جرم، مومنتوم، انرژی و نفوذ جرم است. حل معادلات ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار کامسول (۷۵/۴) و به روش المان محدود بر روی مدل ارائه شده در بخش قبل حل شده است. همچنین شبکه‌ی مورد نظر برای شبیه‌سازی نیز در همان نرم‌افزار کامسول ایجاد شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

تمامی مشخصات فیزیکی هوای مرطوب مانند گرانیوری، ظرفیت گرمایی ویژه و قابلیت هدایت حرارتی به صورت متغیر با دما لحاظ شده است. روابط مربوط به هرکدام از این کمیت‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل ۳. شبکه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی.

تغییر زاویه‌ی بازتابنده است که برای ساعات مختلف روز از طریق پارامتر قابل تنظیم نرم‌افزار کامسول طی ۱۰ ساعت به دست آمده است. زاویه‌ی φ برای دو حالت اولیه‌ی چرخاننده اعمال شده است. همچنین برای پوشش شیشه‌ی شرط مرزی تشعشع اعمال شده است که h_r به صورت $(T_s^t + T_{amb}^t) \sigma \varepsilon$ تعریف شده است که در آن دمای محیط برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

۱.۲.۲. روابط نظری مدل دانکل

به منظور محاسبه‌ی عملکرد ساعتی آب‌شیرین‌کن یک رابطه‌ی تجربی برای ارزیابی ضریب انتقال حرارت درون آب‌شیرین‌کن به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته که توسط دانکل توسعه داده شده است. این مدل بر اساس روابط شارپلی^۲ و بولتر^۳ و ژاکوب^۴ بود که عبارت‌اند از: [۲۲]

$$h_c = 0.884 \times (\Delta T)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

$$\Delta T = \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) \times (T_w + 273)}{2687.9 \times 10^3 - P_w} \right] \quad (9)$$

$$P_w = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T_w + 273} \right) \quad (10)$$

$$P_g = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T_g + 273} \right) \quad (11)$$

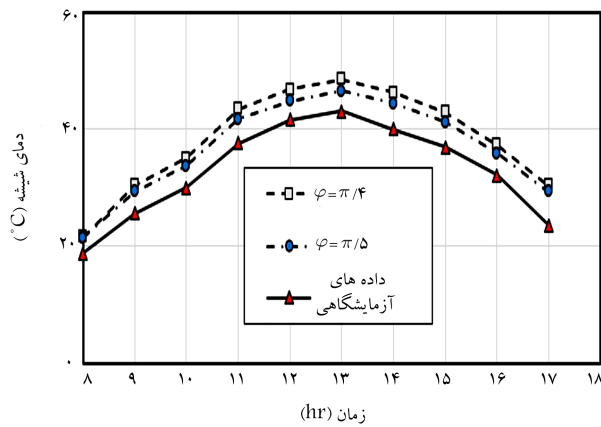
که در آن p_w و p_g به ترتیب فشار جزئی بخار در دمای آب و شیشه است. ضریب انتقال حرارت تبخیر مدل دانکل نیز چنین بیان می‌شود:

$$h_{ev} = 0.0163 \times h_c \frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \quad (12)$$

$$q_{ev} = h_{ev} (T_w - T_g) \quad (13)$$

$$m_{Hourly} = \frac{q_{ev}}{h_{fg}} \times A_s \times 3600 \quad (14)$$

که در رابطه‌ی ۱۴ m_{Hourly} عملکرد ساعتی آب‌شیرین‌کن است.



شکل ۶. مقایسه‌ی دمای شیشه شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی فروغی‌نیا [۲۴] در ساعات مختلف بیستم آبان ۱۳۹۶.

افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. این رفتار مطابق انتظار، ناشی از روند شدت تابش خورشید است و بدون توجه به زاویه‌ی بازتابنده‌ی بیشینه دما در ساعت ۱۳ است. در ساعات صبح به دلیل اختلاف کم دمای سطح آب و پوشش شیشه‌یی مشاهده می‌کنیم که زاویه‌ی ابتدایی بازتابنده ($\pi/5$) تأثیرگذار است اما تأثیر آن چندان قابل ملاحظه نیست و چرخاندن بازتابنده‌های خارجی از اهمیت بالاتری برخوردارند. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده موجب افزایش ۷ درصدی دمای آب و در نتیجه افزایش میزان بهره‌وری خواهد شد که پژوهش‌های قبلی [۹] مؤید این نتیجه بوده‌اند. همچنین در ساعات مختلف اختلاف نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی یکسان نیست؛ دلیل این امر احتمالاً در نظر نگرفتن افت تابش خورشید در شبیه‌سازی است.

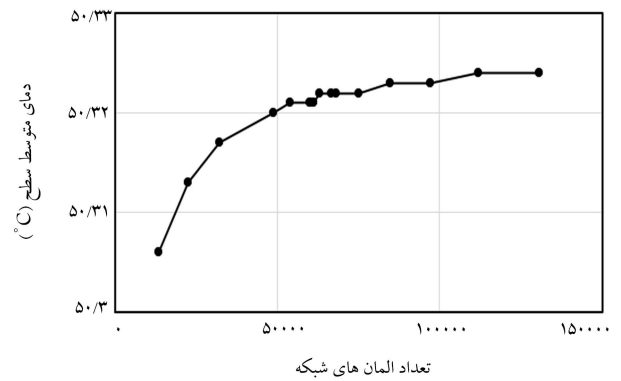
دمای شیشه برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی (شکل ۶) از ساعت ۸ صبح تا ۱۳ ظهر به طور یکنواخت افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد؛ این رفتار نیز از روند شدت تابش خورشید پیروی می‌کند. بنابراین در هر دو حالت چرخش بازتابنده، بیشینه دما را در ساعت ۱۳ شاهد هستیم و با چرخش اولیه‌ی آن دمای شیشه ۴ درصد تغییر یافته است که بدیهی است افزایش آن از دمای آب کم‌تر باشد.

از مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی درمی‌یابیم که هر دو الگوی مشابهی را پیروی می‌کنند اما بین این دو مقادیر در هر مرحله از زمان اختلاف کوچکی وجود دارد که پژوهش کومار [۲۵] نیز مؤید همین نتیجه است. این اختلاف مربوط به این واقعیت است که، شبیه‌سازی ویژگی‌های ایده‌آل شیشه را در نظر می‌گیرد که ممکن است با خواص واقعی شیشه‌ی مورد استفاده در آزمایش متفاوت باشد. همچنین در نتایج شبیه‌سازی افت تابش خورشید در نظر گرفته نمی‌شود که خود یک عامل اختلاف بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی می‌شود.

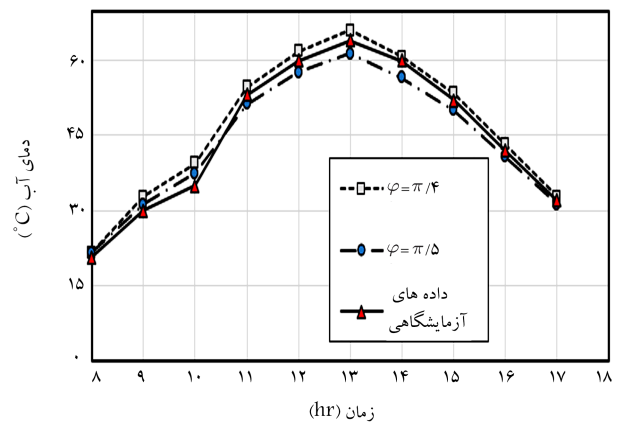
در شکل‌های ۷ و ۸ کانتورهای دمای استاتیک آب شیرین‌کن برای ساعت ۱۳ نشان داده شده است که در این ساعت متوسط دمای آب حوضچه 62°C و دمای پوشش شیشه‌یی 42°C است.

در اثر گرادیان دمایی در داخل محفظه خطوط هم‌دما به وجود آمده است. در اثر نیروی شناوری این خطوط به صورت لایه‌یی هستند. همچنین مشهود است که زاویه‌ی ابتدایی بازتابنده‌ی ورودی به کف حوضچه تأثیرگذار بوده است اما با چرخش آن شاهد افزایش دمای کف حوضچه هستیم، یعنی میزان تابش بیشتری به آن برخورد کرده است.

در شکل ۹ کانتورهای سرعت درون محفظه‌ی آب شیرین‌کن در ساعت ۱۳ نشان



شکل ۴. دمای متوسط سطح برحسب تعداد المان‌های شبکه.



شکل ۵. مقایسه‌ی دمای آب شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی فروغی‌نیا [۲۴] در ساعات مختلف بیستم آبان ۱۳۹۶.

۲.۳. بررسی استقلال از شبکه

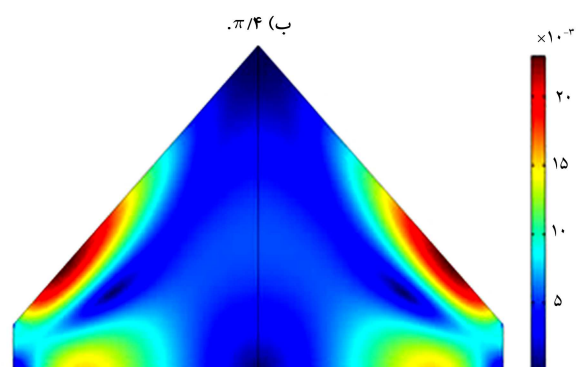
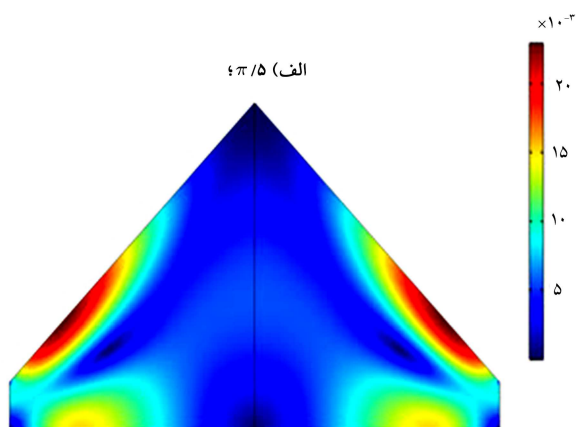
به منظور بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از شبکه‌ی ایجاد شده، مدل مذکور با تعداد المان‌های مختلف از نوع مش مثلثی ایجاد شده است. کمیت انتخابی برای این منظور، دمای متوسط سطح است. شکل ۴ هم‌گرایی دمای متوسط سطح با تغییر اندازه‌ی شبکه‌ها را نشان می‌دهد. در نهایت شبکه با تعداد ۸۴۷۵۶ المان برای مطالعه انتخاب شد.

۳.۳. اعتبارسنجی نتایج حل عددی

چنان‌که پیش‌تر اشاره شد برای اعتبارسنجی حل، دمای آب پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی فروغی‌نیا [۲۴] مربوط به ۲۵ آبان ماه سال ۱۳۹۶ مقایسه شده است. نتایج مقایسه برای ساعات مختلف روز، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی وجود دارد. بیشینه‌ی خطای شبیه‌سازی ۱۱ درصد بوده که این میزان مشابه با پژوهش انجام شده است و در مطالعات عددی قابل قبول است. بنابراین شبیه‌سازی می‌تواند با دقتی مناسب، نتایج حاصل از تحلیل تجربی را محاسبه و مدل کند.

۴. بحث و بررسی نتایج

شکل ۵ نشان می‌دهد که دمای آب از ساعت ۸ صبح تا ۱۳ ظهر به طور یکنواخت

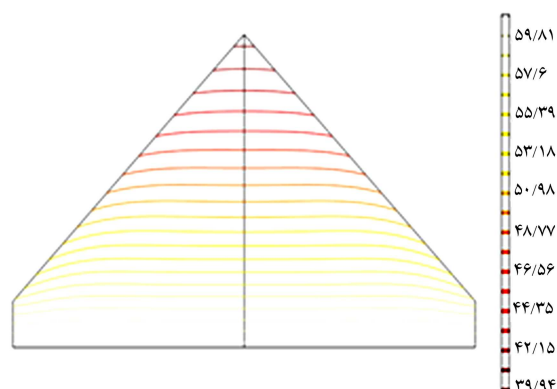
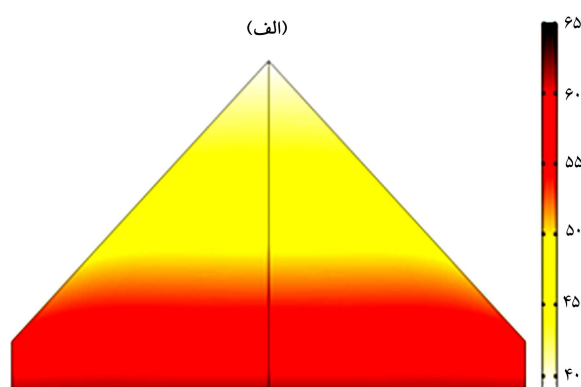


شکل ۹. مقیاسه‌ی کانتورهای سرعت آب شیرین‌کن مربوط به ساعت ۱۳ در دو حالت مختلف چرخانده.

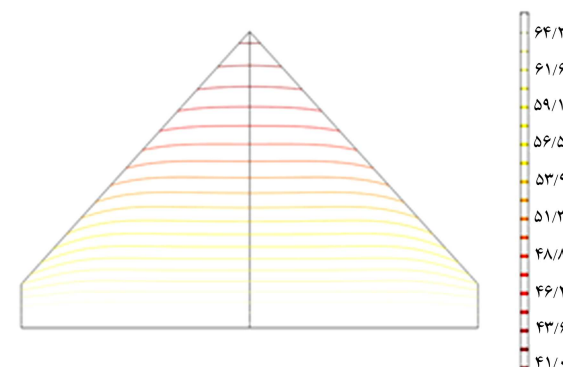
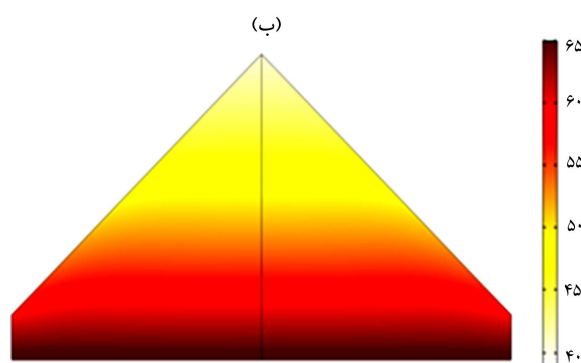
داده شده است. در هر دو شکل بیشترین مقدار سرعت در نزدیک کف حوضچه و پایین پوشش شیشه‌یی است که به دلایل ورود فلاکس حرارتی و همچنین شیب پوشش شیشه‌یی است. لازم به یادآوری است که فاز در نظر گرفته شده در سراسر محفظه، فاز بخار است. بیشینه‌سرعت مربوط به نزدیکی پوشش شیشه‌یی است. همان‌طور که مشهود است چرخاندن زاویه‌ی ابتدایی بازتابنده تأثیر چندانی بر میزان سرعت نداشته است.

در شکل ۱۰ گردابه‌های ایجاد شده و بردارهای سرعت درون محفظه‌ی آب شیرین کن در ساعت ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌کنیم که به علت وجود گردابه‌ها، بردار سرعت نزدیک پوشش شیشه‌یی، به سمت بالا است. همچنین به دلیل این‌که فاز در نظر گرفته شده در محفظه فاز بخار است، حرکت فاز بخار به سمت بالا دیده می‌شود، در حالی که اگر مایع روی شیشه بود به علت گرانش، رو به پایین روانه می‌شد. شروع بردارهای سرعت از دیواره‌ی پایینی (گرم) و به طرف پوشش شیشه‌یی (سرد) است که این پدیده باعث تبادل حرارت و جابه‌جایی طبیعی درون آب شیرین‌کن می‌شود.

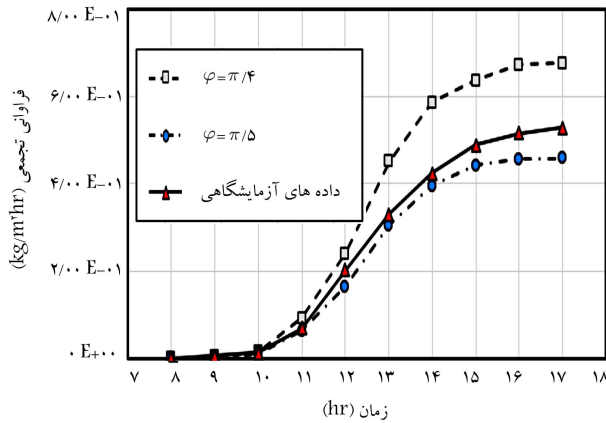
در شکل ۱۱ نتایج مقدار آب مقطر تولیدی شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای ساعت ۸ صبح تا ۱۷ عصر نشان داده شده است. از آن‌جا که داده‌های آزمایشگاهی هر نیم‌ساعت یک‌بار اندازه‌گیری شده‌اند و همچنین خطاهای مربوط به دقت حجم‌سنج، نوسان اندک سطح آب به دلیل یکنواخت نبودن واقعی جریان، وجود مقدار کم ولی غیرقابل اجتناب اصطکاک بین سیال و جداره‌ی ظرف به دلیل لزجت سیال و تجمع‌ی بودن خطای تجربی، بیشینه‌ی میزان آب تولیدی در ساعت ۱۲ گزارش شده است. این در حالی است که نتایج شبیه‌سازی ارائه شده توسط نرم‌افزار



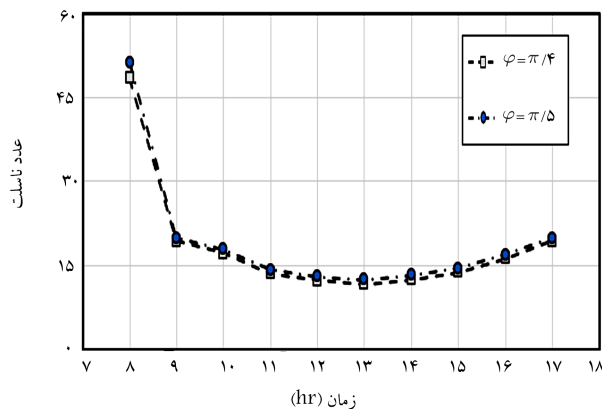
شکل ۷. کانتورهای دمای آب شیرین‌کن مربوط به ساعت ۱۳ در $\pi/5$.



شکل ۸. کانتورهای دمای آب شیرین‌کن مربوط به ساعت ۱۳ در $\pi/4$.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی فراوانی تجمعی آب تولیدی شبیه‌سازی و نتایج تجربی فروغی نیا [۲۴] برحسب زمان.



شکل ۱۳. عدد نسلت برحسب زمان.

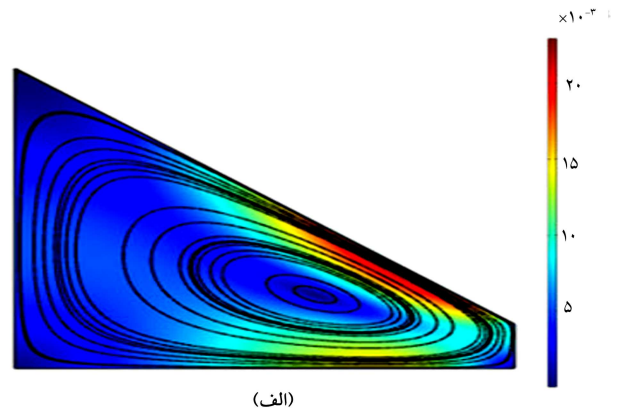
که در نتیجه عدد نسلت بیشترین مقدار خود را دارد. با گذشت زمان دمای آب و محیط تقریباً به همدیگر نزدیک می‌شوند و پتانسیل انتقال گرما کم‌تر شده تا این که در زمان ۱۳ ظهر کم‌ترین میزان انتقال گرما را داریم و عدد نسلت به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. همچنین با تغییر زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده عدد نسلت ۵ درصد کاهش یافته است.

۵. نتیجه‌گیری

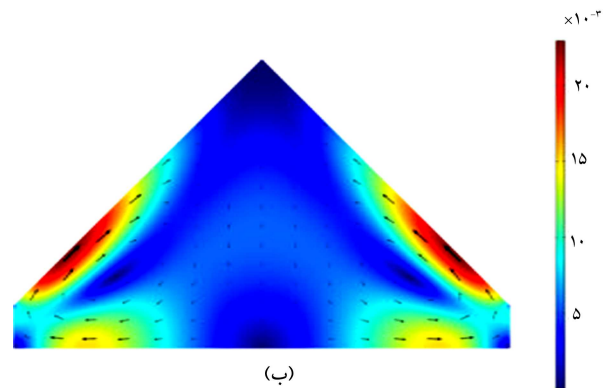
در این تحقیق جریان سیال درون محفظه‌ی آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوطرفه همراه با بازتابنده‌های خارجی چرخان از پایین به کف حوضچه شبیه‌سازی شده است. با در نظر گرفتن شرایط هوای مرطوب داخل آن به نرخ تولید آب شیرین توسط آب‌شیرین‌کن و تأثیر زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده‌ها بر دمای آب و شیشه پرداخته شده است. برخی از نتایج قابل توجه و مهم در این تحقیق عبارتند از:

-- تغییر اندک در زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده باعث افزایش ۷ درصدی دمای آب، ۴ درصدی دمای شیشه، ۳۲ درصدی تولید آب شیرین و کاهش ۵ درصدی عدد نسلت می‌شود؛

-- اختلاف دمای بین سطح آب شور و سطح پوشش شیشه‌ی تأثیر مستقیم بر تولید آب شیرین داشته و افزایش آن سبب افزایش تولید و بهره‌وری آب‌شیرین‌کن می‌شود.

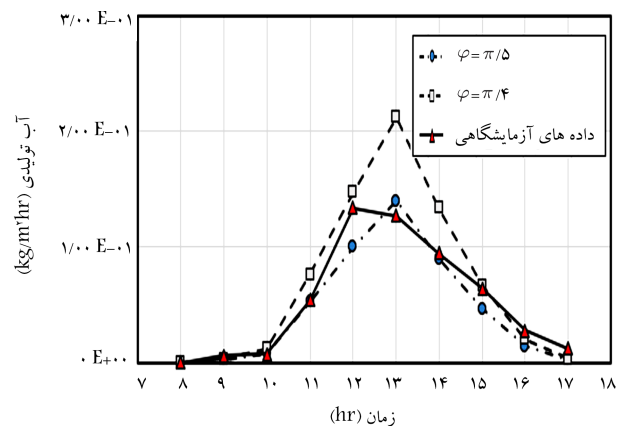


(الف)



(ب)

شکل ۱۰. الف) گردابه‌های ایجاد شده در آب شیرین‌کن و ب) بردارهای سرعت در آب شیرین‌کن خورشیدی مربوط به ساعت ۱۳.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی آب تولیدی شبیه‌سازی شده و نتایج تجربی فروغی نیا [۲۴] در بیست‌و‌نُه ساعت.

در هر ثانیه گزارش شده از دقت بالاتری برخوردار است. علاوه بر آن طبق نمودارهای دمای آب و شیشه که بیشینه دما در ساعت ۱۳ گزارش شده و انتظار می‌رود که میزان آب تولیدی در این دما بالاتر باشد. این روند در نتایج شبیه‌سازی به خوبی مشهود است، همچنین با تغییر زاویه‌ی اولیه‌ی بازتابنده و افزایش فلاکس حرارتی ورودی به کف حوضچه میزان آب تولیدی ۳۲ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۲ نیز فراوانی تجمعی آب تولیدی در زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

در شکل ۱۳ عدد نسلت برحسب زمان نشان داده شده است. در ابتدا ساعت ۸ صبح به دلیل اختلاف زیاد دمای آب و محیط، پتانسیل انتقال گرما بیشتر است

پانوشتها

1. Tanaka
2. Sharpley
3. Boelter
4. Jakob
5. Kumar

(References) منابع

1. Khare, V.R., Singh, A.P., Kumar, H. and et al. "Modelling and performance enhancement of single slope solar still using CFD", *Energy Procedia*, **109**, pp. 447-455 (2017).
2. Belessiotis, V., Kalogirou, S. and Delyannis, E. "Thermal solar desalination: methods and systems", Elsevier (2016).
3. Tiwari, G. and sahota, L. "Advanced solar-distillation systems: basic principles", Thermal Modeling, and Its Application, Springer (2017).
4. Tiwari, G. and Tiwari, A.K. "Solar distillation practice for water desalination systems", Anshan Pub (2008).
5. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", Pearson Education (2007).
6. Tamimi, A. "Performance of a solar still with reflectors and black dye", *International Journal of Solar Energy*, **5**(4) pp. 229-235 (1987).
7. El-Sebaai, A. "Effect of wind speed on some designs of solar stills", *Energy Conversion and Management*, **41**(6), pp. 523-538 (2000).
8. El-Swify, M. and Metias, M. "Performance of double exposure solar still", *Renewable Energy*, **26**(4), pp. 531-547 (2002).
9. Tanaka, H. "Monthly optimum inclination of glass cover and external reflector of a basin type solar still with internal and external reflector", *Solar Energy*, **84**(11), pp. 1959-1966 (2010).
10. Al-Garni, A.Z. "Effect of external reflectors on the productivity of a solar still during winter", *Journal of Energy Engineering*, **140**(1), 04013002 (2013).
11. Estahbanati, M.K., Ahsan, A., Feilizadeh, M. and et al. "Theoretical and experimental investigation on internal reflectors in a single-slope solar still", *Applied Energy*, **165**, pp. 537-547 (2016).
12. Edalatpour, M., Aryana, K., Kianifar, A. and et al. "Solar stills: a review of the latest developments in numerical simulations", *Solar Energy*, **135** pp. 897-922 (2016).
13. Lokhande, A.A. and Shaikh, S. "Performance investigation of single basin double slope solar still with and without phase change material and effect of reflector and fins", **5**, pp. 2395-0056 (2018).
14. Sahoo, B.B. and Subudhi, C. "Performance enhancement of solar still by using reflectorsjute cloth-improved class angle", *The Journal of Engineering Research (TJER)*, **16**(1), p. 10 (2019).
15. Ketabchi, F., Gorjian, S., Sabzehparvar, F. and et al. "Experimental performance evaluation of a modified solar still integrated with a cooling system and external flat-plate reflectors", *Solar Energy*, **187**, pp. 137-146 (2019).
16. Joe Patrick Gnanaraj, S. and Velmurugan, V. "Experimental investigation on the performance of modified single basin double slope solar stills", *International Journal of Ambient Energy*, pp. 1-20 (2019). DOI=10.1080/01430750.2019.1636861.
17. Assari, M., Basirat Tabrizi, H., Parvar, M. and et al. "Performance of rotating solar still with rotating external reflectors (RESEARCH NOTE)", *International Journal of Engineering*, **32**(6) pp. 884-892 (2019).
18. Maalem, M., Benzaoui, A. and Bouhenna, A. "Modeling of simultaneous transfers of heat and mass in a trapezoidal solar distiller", *Desalination*, **344**, pp. 371-382 (2014).
19. Gokilavani, N.S., Prabhakaran, D. and Kannadasan, T. "Experimental studies and CFD modeling on solar distillation system", *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, **3**(9), pp. 15818-15822 (2014).
20. DevRoy, A., Prakash, O., Singh, S. and et al. "Application of software in predicting thermal behaviours of solar stills", In: *Solar Desalination Technology*, Springer, pp. 105-148 (2019).
21. Rahbar, N. and Esfahani, J.A. "Productivity estimation of a single-slope solar still: Theoretical and numerical analysis", *Energy*, **49**, pp. 289-297 (2013).
22. Edalatpour, M., Kianifar, A. and 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*, **66**, pp. 63-70 (2015).
23. Rahbar, N. and Esfahani, J.A. "Estimation of convective heat transfer coefficient in a single-slope solar still: a numerical study", *Desalination and Water Treatment*, **50**(1-3), pp. 387-396 (2012).
24. Forooghi Nia, M. "Experimental investigation of a rotating solar still using external reflectors", Master's Thesis, Jundi-Shapour University of technology, Dezful, (In Persian) (2018).
25. Kumar, A., *CFD Modeling And Validation Of A Single Slope Solar Still*, MNIT Jaipur (2015).