

بهسازی تولید در آب شیرین کن خورشیدی لوله‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی

احسان فتوحی بافقی^{۱،*،۲}، نادر رهبر^۳ و جواد ابوالفضللی اصفهانی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: آب شیرین کن خورشیدی، شبیه‌سازی عددی، جابه‌جایی طبیعی آرام، محفظه‌ی بسته‌ی دایره‌ای، روش حجم محدود، بهسازی تولید.</p>	<p>در سال‌های اخیر به دلیل کمبود آب آشامیدنی، دانشمندان تحقیقات فراوانی را به منظور توسعه‌ی روش‌ها و بهینه‌سازی دستگاه‌های شیرین‌کننده‌ی آب‌های شور انجام داده‌اند. آب شیرین‌کن‌های خورشیدی به دلیل استفاده از انرژی پاک خورشید و نداشتن هیچ‌گونه سروصدا و آلودگی صوتی، می‌توانند بهترین جایگزین برای آب شیرین‌کن‌های متداول باشند. در این تحقیق با در نظر گرفتن شرایط هوای مرطوب در آب شیرین‌کن خورشیدی لوله‌ای، به شبیه‌سازی عددی جابه‌جایی طبیعی آرام، انتقال جرم و حرارت داخل آن پرداخته شده است. جهت این کار معادلات سرعت-فشار، بالانس انرژی و جرم به صورت دوفضایی بیان شده و از روش حجم محدود برای حل معادلات مذکور استفاده شده است. علاوه بر آن در این پژوهش تأثیر شکل هندسی ظرف آب‌شور، مکان قرارگیری و عمق آب شور داخل آن و همچنین شعاع پوشش دایره‌ای بر روی تولید ارائه و بررسی شده است. مقایسه‌ی نتایج، نشان‌دهنده‌ی تطابق خوب حل عددی با جواب تجربی می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که بهترین شکل هندسی ظرف آب شور به شکل نیم‌دایره می‌باشد. همچنین حداکثر ارتفاع بین کف ظرف آب شور و پوشش دایره‌ای، عمق آب شور داخل، همچنین شعاع پوشش به منظور داشتن حداکثر تولید، به ترتیب ۱۲۴/۹ میلی‌متر، ۴۸ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر می‌باشند.</p>

۱- مقدمه

هوا و آب آشامیدنی دو جزء بسیار مهم برای زندگی انسان‌ها می‌باشند. بسیاری از مناطق جهان از جمله مناطق ساحلی و خشک از کمبود آب آشامیدنی رنج

می‌برند. از طرف دیگر، این مناطق منابع کافی برای تولید توان الکتریکی جهت شیرین کردن آب را ندارند. بنابراین برای این‌گونه نواحی باید به دنبال تکنیک و تکنولوژی مناسب جهت شیرین کردن آب بود. روش‌های گوناگون شیرین کردن آب بر دو پایه‌ی دما و غشاء مانند روش‌های تقطیر، اسمز معکوس، الکترو دیالیز و ... می‌باشند. با توجه به شرایط کنونی جهان روشی مورد توجه عموم است که دارای ویژگی‌هایی نظیر مصرف انرژی پایین، راندمان بالا، سهولت استفاده، ارزان و پاک بودن و ... باشد [۱-۳]. با توجه به ویژگی‌های نام برده شده، روش تقطیری

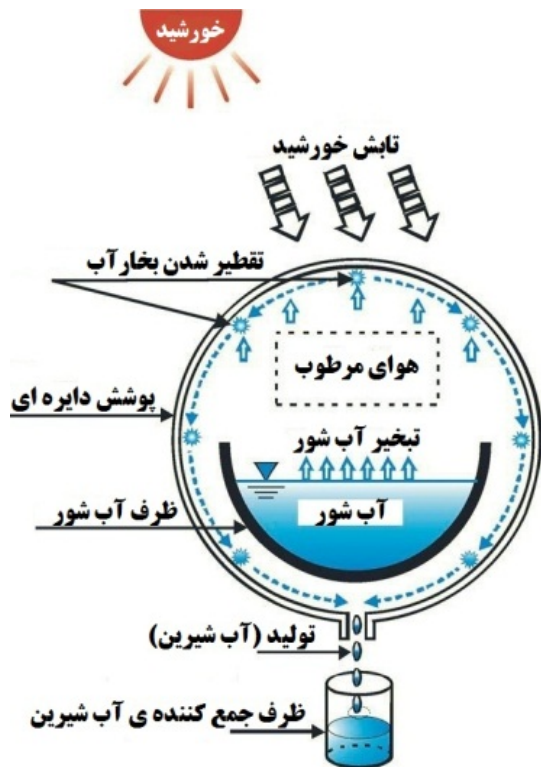
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ehsansytif@gmail.com

۱. پژوهشگر، شرکت سنگ آهن مرکزی ایران- بافق، دفتر تحقیق و توسعه
 ۲. مدرس، دانشگاه جامع علمی و کاربردی، واحد بافق، دانشکده‌ی فنی
 ۳. عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان، گروه مکانیک
 ۴. استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱- گروه مکانیک ۲- قطب علمی مدل‌سازی و کنترل سیستم‌ها

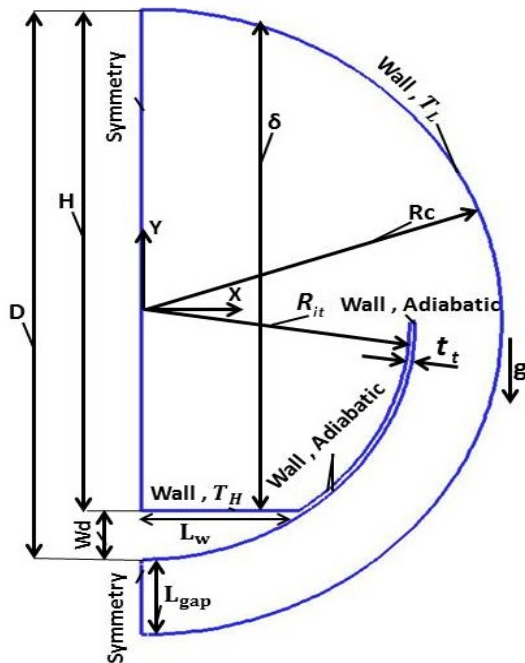
مطالعه سیستم‌هایی که انجام آزمایشات روی آن‌ها مشکل و غیرممکن است، اشاره نمود [۷] و [۸]. همچنین روش تحلیل عددی نسبت به روش تحلیل تجربی به‌منظور تغییر ساده‌ی پارامترهایی نظیر ابعاد هندسه، شرایط مرزی، ضخامت شیشه و مکان تحلیل به صرفه‌تر بوده و می‌تواند در تحقیق عملکرد سیستم‌های انرژی با تغییر جزء‌های مختلف بسیار به ما کمک کند [۹]. آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در شکل‌های مختلفی مانند ذوزنقه‌ای (تشتکی ساده)، لوله‌ای، کروی و ... ساخته می‌شوند. از جمله تحقیقاتی که بر روی آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی لوله‌ای انجام شده است می‌توان به تحقیقاتی نظیر موارد ذیل اشاره داشت. ایسلام و همکاران [۱۰] به بررسی انتقال جرم داخل آب‌شیرین‌کن پرداخته و نشان دادند که ثابت داخل مدل دانکل همیشه ثابت نبوده و به تغییرات دما وابسته و با افزایش دمای آب افزایش می‌یابد. در کاری دیگر ایسلام و فوکوهارا [۱۱] با توجه به شرایط هوای مرطوب داخل آب‌شیرین‌کن تحت شرایط دائم و پایدار مدلی پیشنهاد داده که این مدل می‌تواند دمای آب شور، دمای هوای مرطوب، دمای پوشش و شار تولیدی را تحت حالت دائم و پایدار پیش‌بینی نماید. همچنین موراس و همکاران [۱۲] به آنالیز عددی و تجربی آب‌شیرین‌کن لوله‌ای پرداخته و نشان دادند که قسمت پایین آن نیاز به عایق نداشته و می‌توان آن را داخل زمین نصب نمود. در تحقیق دیگری ایسلام و فوکوهارا [۱۳] با موازنه‌ی جرم و انرژی معادلاتی تئوری ارائه داده و با استفاده از نتایج تجربی، ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و جرم را برای آب‌شیرین‌کن به‌دست آوردند. آنان همچنین مدلی برحسب اختلاف دما بین سطح گرم و سطح سرد را برای محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و جرم ارائه نمودند. در کار دیگری احسان و همکاران [۲] و [۱۴] در دو تحقیق جداگانه به مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی دو آب‌شیرین‌کن لوله‌ای پرداختند. آنان نشان دادند که تبخیر و تقطیر ساعتی در دستگاه تابعی از رطوبت نسبی و دمای هوای مرطوب داخل آن می‌باشد.

می‌تواند روشی مناسب برای شیرین کردن آب باشد. در صورتی که منطقه‌ای از نظر داشتن انرژی خورشیدی غنی باشد، استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی می‌تواند بهترین گزینه‌ی انتخابی برای شیرین کردن آب-های شور و نمکین باشد. از مزایای انرژی خورشیدی می‌توان به فراوانی، پاک و رایگان بودن آن اشاره نمود [۴] و [۵]. در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی ابتدا تشعشع خورشید جذب کف ظرف حاوی آب شور شده و متعاقباً آب درون آن شروع به گرم شدن می‌کند. حرارت دریافتی باعث تبخیر آب درون ظرف می‌شود. بخار آب به‌علت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و چگالی موجود بین سطح آب‌شور و پوشش شیشه‌ای به سمت بالا حرکت می‌کند. بدین ترتیب جریان سیال داخل آب‌شیرین‌کن برقرار می‌شود. بخار آب بالا رفته به شیشه سرد برخورد و تقطیر می‌شود. آب شیرین تولیدی نیز توسط مکانیزمی جمع‌آوری شده و به داخل محفظه‌ی مورد نظر تعبیه شده جهت ذخیره‌سازی آب شیرین راه پیدا می‌کند. پارامترهای مؤثر بر روی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی عبارتند از: زاویه و شدت تابش نور خورشید، سرعت باد، دمای هوا، جنس بدنه و عایق و موقعیت جغرافیایی محل مورد استفاده. بنابراین اساس کار آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بر پایه‌ی انتقال جرم و حرارت داخل آب-شیرین‌کن‌های خورشیدی ناشی از جابه‌جایی طبیعی داخل محفظه به‌علت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و چگالی ایجاد شده در سیال می‌باشد [۶]. به‌منظور تحلیل و بررسی فرایندهای انتقال حرارت، انتقال جرم و جریان سیال از دو روش تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی که خود به دو روش تحلیل تئوری و دینامیک سیالات محاسباتی^۱ دسته‌بندی می‌شود، استفاده می‌کنند. از مزایای روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به هزینه پایه‌گذاری پایین، افزایش سرعت در دستیابی به نتایج، توانایی شبیه‌سازی شرایط واقعی و ایده‌آل، حل مسایل وابسته به زمان در حالت‌های مختلف و توانایی

¹ Computational Fluid Dynamics



شکل ۱- نمایی شماتیک از نحوه ی کار آب شیرین کن خورشیدی لوله ای [۱۴]



شکل ۲- نمایی شماتیک از هندسه ی محفظه ی دایره ای و شرایط مرزی مورد استفاده در مدل سازی عددی

۲-۲- روابط ریاضی

در این تحقیق هوای داخل محفظه ی آب شیرین کن، اشباع در نظر گرفته شده و مدل گاز ایده آل تراکم ناپذیر به منظور

آنان همچنین مدلی را برای محاسبه ی میزان خروجی دستگاه پیشنهاد دادند. همچنین ژنگ و همکاران [۱۵] در یک تحقیق تجربی، طرحی جدید را برای آب شیرین کن های لوله ای پیشنهاد دادند. آنان دستگاه خود را به عنوان آب شیرین کن لوله ای چنداثره نامیدند. مزیت دستگاه آنان این بود که از حرارت آزاد شده هنگام تقطیر آب استفاده کرده و آب اطراف ناحیه تقطیر را دوباره گرم می نمود. با این بهبود آنان به ترتیب افزایش ۴۰ و ۷۰ درصدی را برای آب شیرین کن دو اثره و سه اثره گزارش نمودند. آنان همچنین نشان دادند که با کاهش فشار درون ظرف توسط یک پمپ خلا با توان ۳۰۰ وات می توان به خروجی حدود ۲۰ لیتر بر مترمربع در روز دست یافت.

از بررسی مطالعات گذشته روشن است که بر روی آب شیرین کن های خورشیدی لوله ای تحقیقات اندکی به صورت عددی و تجربی صورت گرفته اما تا به امروز هیچ گونه تحقیقی به منظور بررسی تأثیر هندسه ی ظرف آب شور، مکان قرارگیری، عمق آب داخل آن و همچنین شعاع پوشش دایره ای بر جابه جایی طبیعی حرارت و جرم داخل آن ها صورت نگرفته است. بنابراین در این تحقیق به حل عددی جریان سیال درون یک آب شیرین کن خورشیدی لوله ای پرداخته و بهسازی ابعاد دستگاه را جهت بهره وری بیشتر، مورد بررسی قرار می دهیم.

۲- بیان مسئله

۲-۱- شرح فیزیک مسئله

هندسه ی محفظه ی مورد نظر و شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی عددی در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. این محفظه از یک نیم دایره داخل محفظه و یک پوشش لوله ای تشکیل شده است. دمای نیم دایره ی داخل محفظه بیشتر از دمای پوشش لوله ای می باشد.

$$\dot{m}_{evap} = \dot{m}_{cond} = \rho D_{AB} \frac{dw}{dy} \Big|_{Water\ Surface} \quad (۸)$$

$$h_{c,w-c} = \frac{-K}{(T_H - T_L)} \frac{dT}{dy} \Big|_{Water\ Surface} \quad (۹)$$

۳- حل عددی

۳-۱- روند حل عددی

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت از معادله بقای جرم، مومنتوم، انرژی و نفوذ جرم می‌باشند. حل معادلات ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار فلونت ۶،۳،۲۶ و به روش حجم محدود بر روی مدلی با ابعاد داده شده در کار ایسلام و فوکوها را [۱۳] انجام شده است. جدول ۱ ابعاد مورد استفاده در این تحقیق را ارائه داده است. همچنین از الگوریتم ساده^۱ برای محاسبه‌ی ارتباط بین فشار و سرعت، و برای انفصال ترم‌های جابه‌جایی و درون‌یابی فشار به‌ترتیب از طرح‌های اختلاف بالادست^۲ و استاندارد^۳ استفاده شده است. لازم به ذکر است با فرض متقارن بودن جریان داخل محفظه، مدل به‌صورت نیمه و شبکه‌ی موردنظر برای مدل‌سازی عددی به‌صورت غیرسازمان‌یافته توسط نرم‌افزار گمبیت ۲،۴،۶ ایجاد شده که طرح‌واره‌ی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. حل معادلات مذکور زمانی همگرا فرض شده است که مانده‌ی مقیاس‌شده^۴، تغییرات کمتر یا مساوی ۱۰^{-۶} را برای معادله انرژی و ۱۰^{-۳} را برای سایر معادلات گزارش دهد. مشخصات هوای مرطوب از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته و قابلیت هدایت گرمایی، متغیر و براساس مقادیر داده شده در جدول ۲ مدل شده‌اند.

محاسبه‌ی تغییرات دانسیته در نظر گرفته شده است. برای جریان جابه‌جایی طبیعی پایدار، آرام و دوبعدی و همچنین سیال تراکم‌ناپذیر، معادلات پیوستگی، بقای اندازه حرکت، بقای انرژی و نفوذ جرم در مختصات دکارتی به‌صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۲)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho}{\rho_0} g_y \quad (۳)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (۵)$$

شرایط مرزی نیز در فرایند حل به‌صورت زیر می‌باشند:

روی پوشش دایروی:

$$u = 0, v = 0, T = T_L, C = C \Big|_{T=T_L, \phi=100\%}$$

بر روی سطح آب:

$$u = 0, v = 0, T = T_H, C = C \Big|_{T=T_H, \phi=100\%}$$

بر روی دیواره‌های آدیاباتیک ظرف آب شور:

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

عدد رایلی حرارتی و انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح آب شور و سطح پوشش دایروی نیز به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۱۶]:

$$Ra_T = \frac{g \beta_T (T_H - T_L) \delta^3}{\alpha \nu} \quad (۶)$$

$$q_{c,w-c} = h_{c,w-c} (T_H - T_L) \quad (۷)$$

در رابطه‌ی (۷) مقادیر T_H و T_L به‌ترتیب دمای آب و سطح پوشش دایره‌ای می‌باشند. همچنین نرخ تولید آب شیرین توسط آب‌شیرین‌کن و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین آب و پوشش دایره‌ای، با فرض برابر بودن نرخ تبخیر از روی سطح آب با نرخ تقطیر روی سطح پوشش، از روابط زیر محاسبه خواهند شد [۱۷]:

^۱ Simple Algorithm

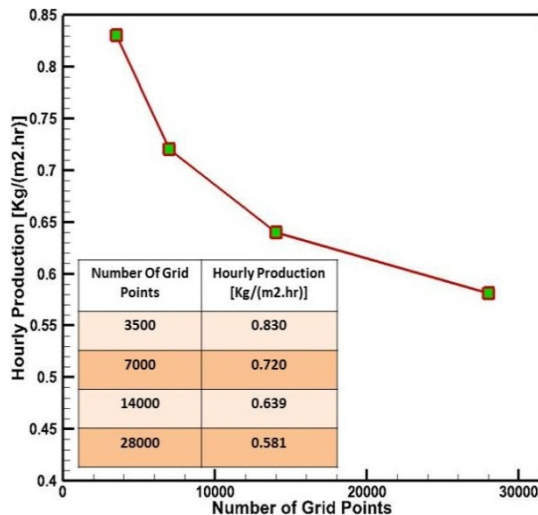
^۲ Upwind

^۳ Standard (Pressure Staggering Option)

^۴ Scaled Residual

۳-۲- بررسی استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال از شبکه‌ی نتایج حل عددی، ۵ نوع مدل با شبکه‌هایی به صورت غیریکنواخت، مثلثی و تعداد المان‌های ۳۵۰۰، ۷۰۰۰، ۱۴۰۰۰ و ۲۸۰۰۰ ایجاد شده است. به علت اهمیت تولید آب خروجی در کارایی آب‌شیرین‌کن‌ها، مقدار متوسط نرخ تولید آب شیرین جهت بررسی حساسیت اندازه شبکه‌ها در دقت نتایج حل عددی، استفاده شده است. شکل ۴ همگرایی نرخ متوسط تولید آب شیرین با تغییر اندازه‌ی شبکه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، شبکه‌ای با تعداد المان ۱۴۰۰۰ که درصد خطای نتایج آن با شبکه‌ای به تعداد المان ۲۸۰۰۰، زیر ۱۰ درصد می‌باشد، برای مطالعه انتخاب شده است.



شکل ۴- بررسی استقلال از شبکه‌ی نتایج حل عددی برای $T_H=63.2^\circ\text{C}$ و $T_L=58.5^\circ\text{C}$

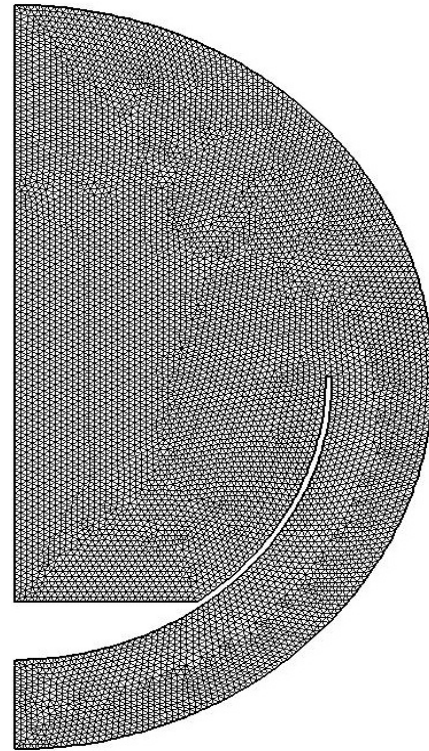
۳-۳- اعتبارسازی نتایج حل عددی

جهت اعتبارسازی روند حل، نتایج حل عددی با نتایج تحقیق تجربی ایسلام و فوکوها را [۱۳] مقایسه شده است. مقایسه نتایج در شکل ۵ برای ساعات مختلف روز نشان داده شده‌اند. مقایسه‌ی بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج تحلیل تجربی نشان می‌دهد که حداکثر خطا ۵/۷ درصد بوده و تطابق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود دارد. این امر نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی می‌تواند با دقتی

جدول ۱- ابعاد آب‌شیرین‌کن مورد استفاده جهت

اعتبارسازی روند حل عددی

R_c (mm)	R_{it} (mm)	t_t (mm)	L_w (mm)	Wd (mm)
64.5	48	1	28	10

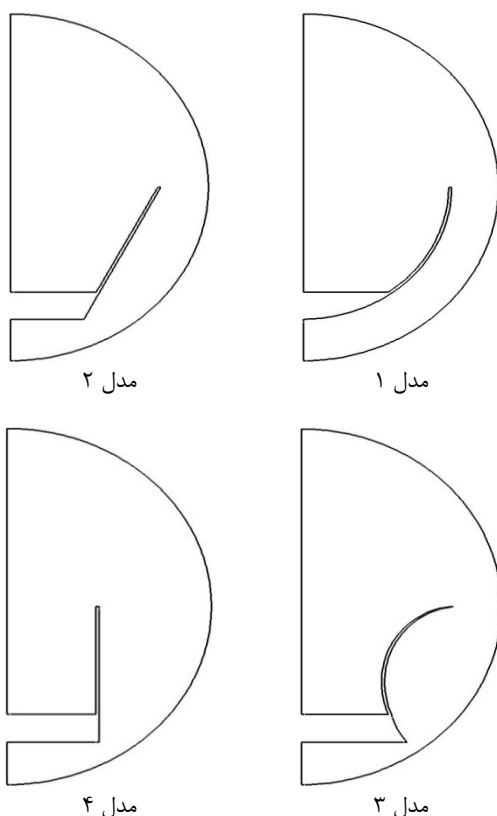


شکل ۳- شبکه‌ی مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

جدول ۲- شرایط هوای مرطوب وابسته به درجه حرارت [۱۶]

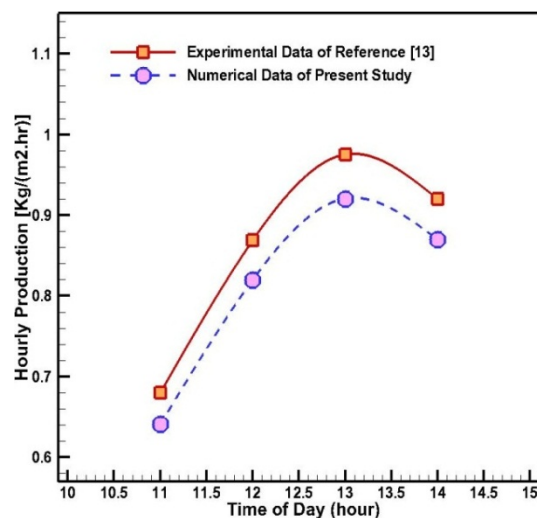
رابطه	کمیت
$C_p = 999.2 + 0.1434 \times T_i + 1.101 \times 10^{-4} \times T_i^2 - 6.758 \times 10^{-8} \times T_i^3$	ظرفیت گرمایی ویژه
$\rho = 353.44 / (T_i + 273.15)$	دانسیته
$K = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} \times T_i$	ضریب هدایت حرارتی
$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8} \times T_i$	لزجت دینامیکی
$\beta_T = 1 / (T_i + 273)$	ضریب انبساط حرارتی
$T_i = (T_H + T_L) / 2$	دمای متوسط

شکل‌های مختلفی مدل و مقدار تولید در آب شیرین کن‌ها محاسبه شده است. لازم به ذکر است که در کلیه مدل‌ها اندازه سطح و عمق آب شور به ترتیب برابر ۲۸ و ۱۰ میلی-متر گرفته شده و دمای آب شور و سطح پوشش، همچنین شعاع پوشش دایره‌ای در تمامی مدل‌ها ثابت فرض گردیده‌اند. در این حال، مقادیر تولید به دست آمده در هندسه‌های متفاوت با هم مقایسه و بهترین هندسه‌ی ظرف جهت داشتن حداکثر تولید، انتخاب شده است. شکل ۶ هندسه‌های مختلف ظرف‌های آب شور را که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. شکل ۷ مقادیر تولید مدل‌های مختلف آب شیرین کن با هندسه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در حالت استفاده از ظرف آب شور نیمه-دایره‌ای (مدل شماره ۱) تولید آب شیرین بیش از ۲ برابر مدل شماره ۳ خواهد بود.



شکل ۶- هندسه‌های مختلف ظرف آب شور مورد استفاده در مدل‌سازی

مناسب، نتایج حاصل از تحلیل تجربی را محاسبه و شبیه‌سازی نماید.



شکل ۵- مقایسه نرخ تولید آب شیرین توسط حل عددی با نتایج تجربی ایسلام و فوکوهارا [۱۳] در ساعات مختلف روز

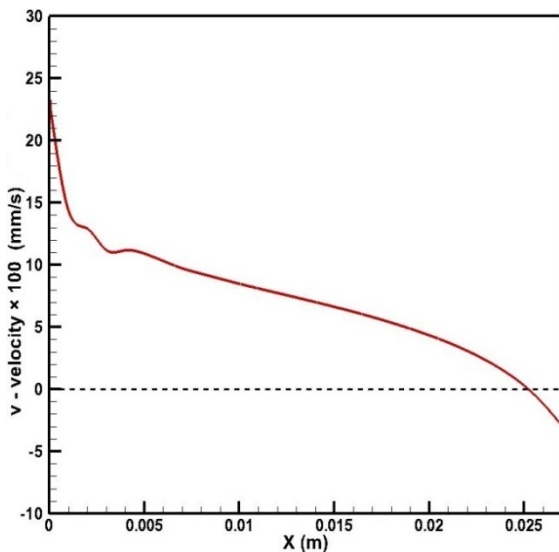
۴- بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق تأثیر شکل هندسی ظرف آب، مکان قرارگیری، عمق آب شور داخل ظرف و همچنین شعاع پوشش دایره‌ای بر روی تولید، به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- تأثیر شکل هندسی ظرف آب شور بر تولید

جابه‌جایی آزاد درون محفظه یکی از مهمترین عوامل موثر بر روی نحوه انتقال بخار از سطح آب شور به پوشش شیشه‌ای می‌باشد. در حقیقت ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی و انتقال جرم به شدت به یکدیگر وابسته بوده و تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی مستقیماً بر روی انتقال جرم درون آب شیرین کن و در نهایت بر روی میزان تولید آن تأثیرگذار می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. از طرف دیگر شکل محفظه می‌تواند مستقیماً بر روی جابه‌جایی آزاد درون محفظه و در نتیجه بر روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تأثیر بگذارد. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر شکل ظرف محتوی آب شور بر روی تولید، ظرف به

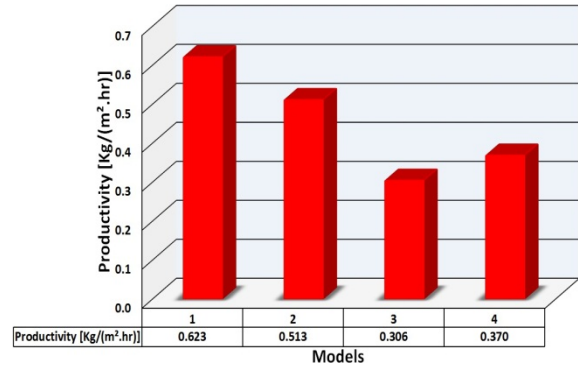
آب شور قرار داد، می‌توان تعداد گردابه‌ی تشکیل شده داخل آب شیرین کن را به دست آورد. مقادیر منفی مولفه‌ی سرعت در راستای عمود، نشان‌دهنده‌ی حرکت رو به پایین هوای مرطوب از سطح پوشش دایروی به سطح آب شور بوده و مقادیر مثبت این سرعت نشان‌دهنده‌ی حرکت رو به بالای هوای مرطوب از سطح آب شور به سطح پوشش دایروی می‌باشند.



شکل ۹- نحوه‌ی تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای y در مدل شکل ۳ در $T_H=63.2^\circ\text{C}$ و $T_L=58.5^\circ\text{C}$

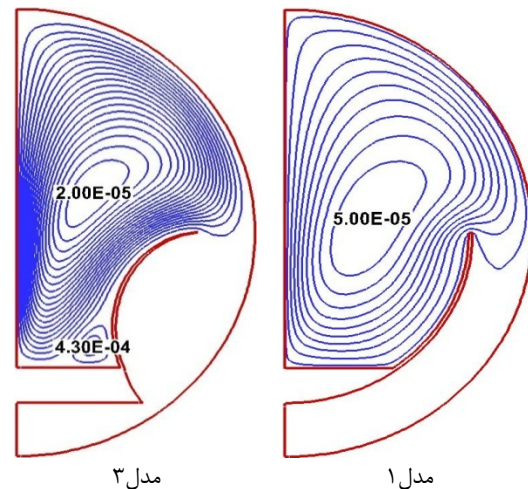
شکل ۱۰ روند تغییرات مولفه سرعت در راستای y را همراه با روند تغییرات دمای هوا در طول سطحی که به فاصله‌ی ۰/۱ میلی‌متر در بالای سطح آب شور قرار دارد، نشان می‌دهد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که روند تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای y با روند تغییرات دمای هوای مرطوب، مشابه می‌باشند. پایین‌ترین دمای هوا در نزدیکی لبه‌ی ظرف خواهد بود که حرکت جریان هوای سرد از سمت شیشه به سمت آب اتفاق افتاده است.

شکل ۱۱ روند تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای عمود، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نرخ تولید را در طول سطحی که به فاصله‌ی ۰/۱ میلی‌متر در بالای سطح آب شور قرار دارد، نشان می‌دهد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که روند تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای y با روند



شکل ۷- نمودار تولید آب با ظرف آب شور در هندسه‌های متفاوت در $T_H=63.5^\circ\text{C}$ و $T_L=59^\circ\text{C}$ ، $R_c=64.5\text{mm}$

شکل ۸ خطوط جریان در دو مدل ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که منظم بودن جریان گردابه‌ی تشکیل شده در مدل ۱، به وجود آمدن گردابه‌های متعدد در مدل ۳ که خلاف جهت هم نیز حرکت می‌کنند، همچنین بیشتر بودن دبی جریان در مدل ۱ می‌تواند از دلایل حداکثر و حداقل شدن تولید در این دو مدل باشند.



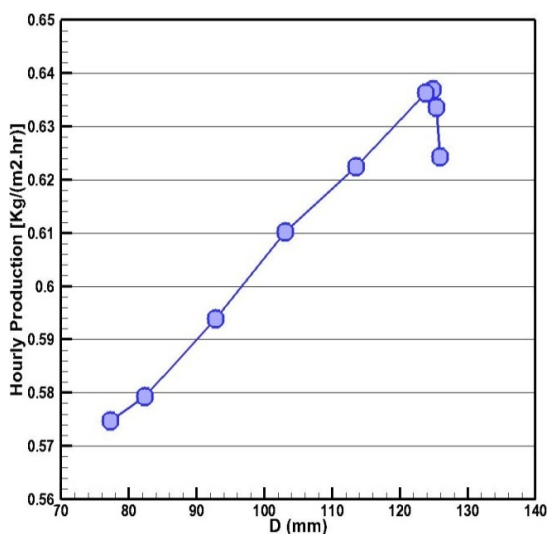
شکل ۸- نحوه جریان سیال داخل آب شیرین کن با هندسه‌های مختلف ظرف در $T_L=59^\circ\text{C}$ ، $R_c=64.5\text{mm}$ و $T_H=63.5^\circ\text{C}$

۴-۲- تأثیر مولفه‌ی سرعت در راستای y

نحوه‌ی تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای y ، در طول سطحی که به فاصله‌ی ۰/۱ میلی‌متر در بالای سطح آب-شور قرار دارد، در شکل ۹ نشان داده شده است. با داشتن جهت‌های مثبت و منفی مولفه‌ی سرعت در راستای عمود در طول سطحی که به فاصله‌ی بسیار نزدیک بالای سطح

۳-۴- تأثیر مکان قرارگیری ظرف آب شور بر تولید

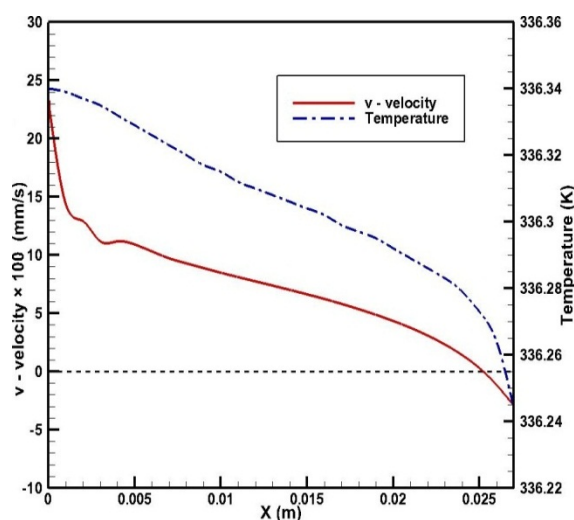
به‌منظور پیدا نمودن بهترین مکان قرارگیری ظرف آب شور داخل آب شیرین‌کن، اندازه‌ی سطح، عمق آب، دمای سطوح آب و پوشش دایره‌ای و همچنین شعاع پوشش ثابت فرض شده و ظرف در مکان‌های مختلفی داخل آب‌شیرین‌کن قرار گرفته است. در این حالت مقادیر تولید آب شیرین به‌منظور پیدا نمودن بهترین مکان، محاسبه شده است. شکل ۱۲ نحوه‌ی تغییرات تولید آب شیرین را در مکان‌های مختلف قرارگیری ظرف آب شور بین کف و بالای پوشش دایره‌ای نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع از ۷۷/۳ تا ۱۲۴/۹ میلی‌متر، تولید زیاد شده اما مجدداً با زیاد شدن ارتفاع از ۱۲۴/۹ تا ۱۲۵/۹ میلی‌متر تولید کاهش خواهد یافت. همچنین حداکثر تولید در ارتفاع ۱۲۴/۹ میلی‌متر به‌دست آمده است که این نقطه می‌تواند نقطه‌ی بهینه‌ی مکان قرارگیری ظرف آب شور داخل محفظه‌ی آب‌شیرین‌کن باشد. علت این‌که ظرف آب در ارتفاعی کمتر از ۷۷/۳ میلی‌متر و بیشتر از ۱۲۵/۹ میلی‌متر داخل محفظه‌ی آب‌شیرین‌کن قرار نگرفته است، این نکته می‌باشد، که در این حالت‌ها ظرف بسیار به پوشش دایره‌ی نزدیک شده، در نتیجه برای جریان چرخشی هوای مرطوب داخل آب‌شیرین‌کن محدودیت ایجاد کرده و این امر از نظر عملی توجیه نخواهد داشت.



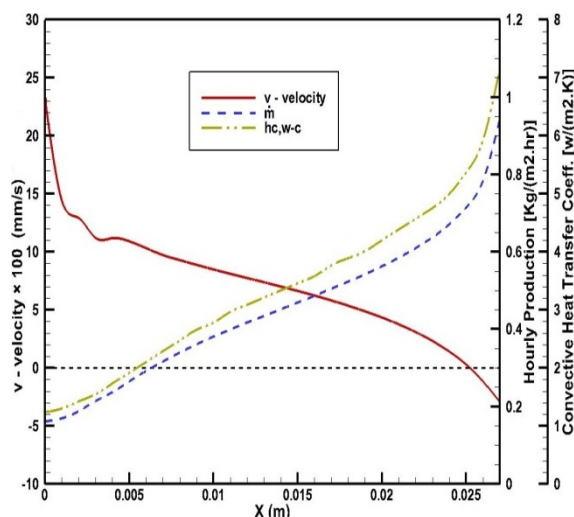
شکل ۱۲- مقدار تولید آب در مکان‌های مختلف قرارگیری ظرف آب شور داخل آب شیرین‌کن در $R_c=64.5\text{mm}$

$$T_H=63.5^\circ\text{C} \text{ و } T_L=59^\circ\text{C}$$

تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نرخ تولید آب رابطه‌ی عکس دارد. همچنین حداکثر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نرخ تولید در فاصله‌ی ۲۷ میلی‌متر از مرکز ظرف آب شور اتفاق افتاده است. از طرف دیگر مقایسه‌ی دو شکل ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که روند کاهش دمای هوا همراه با روند افزایشی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نرخ تولید آب شیرین‌کن خواهد بود.

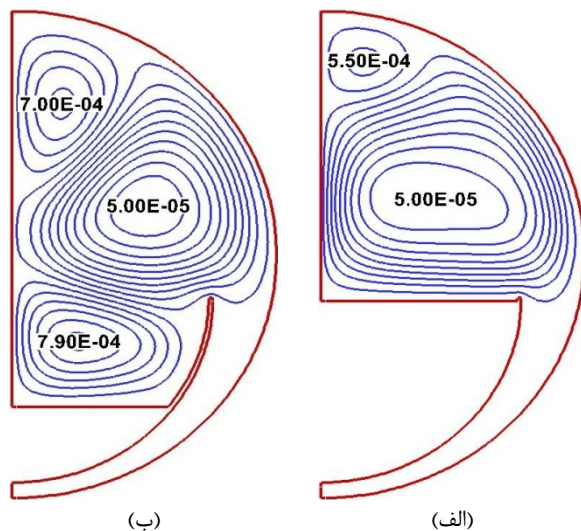


شکل ۱۰- نحوه‌ی تغییرات دمای هوای و مولفه‌ی سرعت در راستای y در مدل شکل ۳ و در $T_H=63.2^\circ\text{C}$ و $T_L=58.5^\circ\text{C}$



شکل ۱۱- نحوه‌ی تغییرات مولفه‌ی سرعت در راستای y ، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و نرخ تولید در مدل شکل ۳ در $T_H=63.2^\circ\text{C}$ و $T_L=58.5^\circ\text{C}$

شکل ۱۴ نحوه‌ی توزیع خطوط جریان را برای عمق‌های ۴۸ و ۲۰ میلی‌متر آب داخل ظرف نشان می‌دهد. از جمله دلایل حداکثر و حداقل شدن نرخ تولید در عمق‌های ۴۸ و ۲۰ میلی‌متر که در این شکل نیز قابل مشاهده است، می‌توان به ایجاد گردابه‌ی منظم بر روی سطح آب شور داخل محفظه در عمق ۴۸ میلی‌متر و به‌وجود آمدن گردابه‌های نامنظم، که خلاف یکدیگر نیز چرخش می‌کنند، در محفظه‌ی دارای عمق ۲۰ میلی‌متر اشاره نمود. همچنین گردابه‌ی مخرب بسیار کوچکی که در بالای محفظه با عمق ۴۸ میلی‌متر به‌وجود آمده، نسبت به گردابه‌ی مخرب مشابه به‌وجود آمده در عمق ۲۰ میلی‌متر، دارای قدرت کمتری می‌باشد.



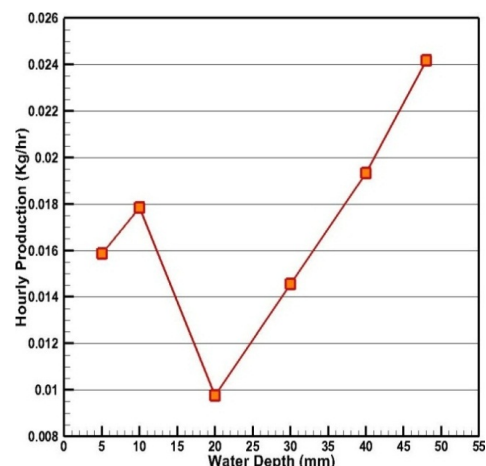
شکل ۱۴- نحوه‌ی توزیع خطوط جریان در شرایط $R_e=64.5\text{mm}$ ، $T_H=63.5^\circ\text{C}$ و $T_L=59^\circ\text{C}$ ، $D=124.9\text{mm}$ برای عمق‌های آب در مقادیر الف: ۴۸ میلی‌متر ب: ۲۰ میلی‌متر

۴-۵- تأثیر شعاع پوشش دایره‌ای بر تولید

در این تحقیق به‌منظور پیدا نمودن شعاع بهینه برای پوشش دایره‌ای، سطح و عمق آب داخل ظرف به‌ترتیب برابر $47/9$ و 48 میلی‌متر ثابت در نظر گرفته شده، همچنین دمای آب و پوشش دایره‌ای و مکان قرارگیری ظرف آب نیز در ارتفاع $124/9$ میلی‌متر ثابت فرض شده است. در این حالت آب‌شیرین‌کن‌هایی با شعاع‌های مختلف مدل شده و از نتایج آن‌ها جهت پیدا نمودن بهترین شعاع پوشش دایره‌ی استفاده شده است. لازم به ذکر است که مکان قرارگیری ظرف آب و عمق آب داخل

۴-۴- تأثیر عمق آب‌شور بر تولید

به‌منظور پیدا نمودن بهترین عمق آب درون ظرف، دمای آب و پوشش دایره‌ای و شعاع پوشش ثابت فرض شده، همچنین مکان قرارگیری ظرف آب شور نیز در ارتفاع $124/9$ میلی‌متر، که بهترین مکان قرارگیری ظرف می‌باشد، ثابت فرض گردیده است. در این حالت تولید دستگاه در مقادیر مختلف عمق آب به‌دست آمده، و برای پیدا نمودن بهترین عمق آب شور داخل ظرف، مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است در این بررسی سطح آب شور مطابق با تغییرات عمق آب، تغییر می‌کند و محل قرارگیری ظرف آب‌شور، همان محل بهینه‌ی به‌دست آمده از شکل ۱۲ می‌باشد. شکل ۱۳ نحوه‌ی تغییرات تولید آب شیرین را در عمق‌های مختلف آب داخل ظرف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند با افزایش عمق آب از ۵ تا ۱۰ میلی‌متر، افزایش تولید در دستگاه اتفاق خواهد افتاد. اما با افزایش بیشتر عمق آب تا ۲۰ میلی‌متر کاهش تولید اتفاق افتاده و مجدداً با افزایش ارتفاع روند افزایشی در تولید آب شیرین خواهیم داشت. بنابراین حداکثر و حداقل نرخ تولید آب شیرین به‌ترتیب در عمق‌های ۴۸ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشند. از طرف دیگر عمق بیشتر از ۴۸ میلی‌متر برای آب‌شور داخل ظرف باعث پر و سرریز شدن ظرف آب‌شور شده و در عمل نمی‌توان عمقی بیش از آن را برای آب‌شور داخل ظرف در نظر گرفت.



شکل ۱۳- مقدار تولید آب در عمق‌های مختلف آب در شرایط $T_H=63.5^\circ\text{C}$ و $T_L=59^\circ\text{C}$ ، $D=124.9\text{mm}$ ، $R_e=64.5\text{mm}$

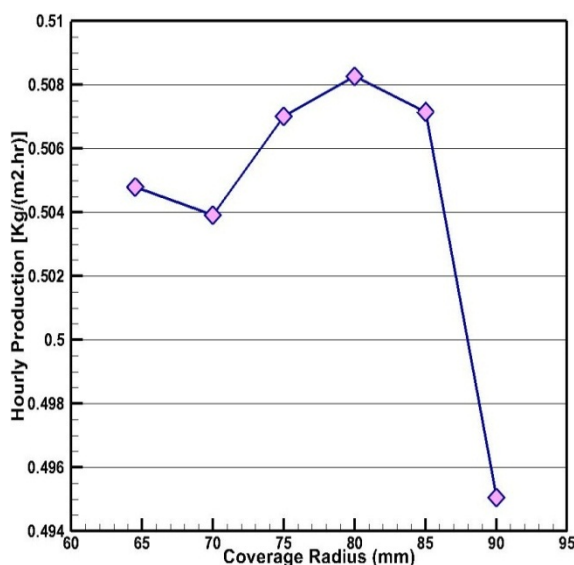
آب‌شیرین کن پرداخته شده است. برخی از نتایج قابل توجه و مهم‌تر در این تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- شبیه‌سازی عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند با دقت خوبی دبی خروجی آب‌شیرین کن را پیش‌بینی نماید.
- هندسه‌ی نیم‌دایره بهترین هندسه برای ظرف حاوی آب شور می‌باشد.
- حداکثر نرخ تولید آب شیرین در صورتی که عمق آب در حداکثر فاصله‌ی کف ظرف آب‌شور تا بالای پوشش دایره‌ای برابر ۱۲۴/۹ میلی‌متر باشد، به‌دست آمده است که این نقطه می‌تواند نقطه‌ی بهینه‌ی مکان قرارگیری ظرف آب‌شور باشد.
- حداکثر و حداقل نرخ تولید آب شیرین به ترتیب در عمق ۴۸ و ۲۰ میلی‌متر بوده و در نتیجه عمق آب شور ۴۸ میلی‌متر داخل ظرف بهترین عمق آب شور به‌منظور داشتن حداکثر تولید می‌باشد.
- حداکثر نرخ تولید در شعاع پوشش دایره‌ای، برابر ۸۰ میلی‌متر به‌دست آمده است؛ که این نقطه می‌تواند بهترین شعاع پوشش دایره‌ای به‌منظور داشتن بیشترین نرخ تولید آب شیرین در نظر گرفته شود.

فهرست علائم

C	تمرکز جزءها، کیلومول بر مترمکعب
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، کیلوژول بر کیلوگرم-کلوین
D	فاصله بین کف ظرف آب و پوشش دایروی، میلی‌متر
D_{AB}	ضریب پخش دوتایی، مترمربع بر ثانیه
g	شتاب جاذبه، متربرمجذورثانیه
H	حداکثر فاصله بین سطح آب شور و سطح پوشش، متر
$h_{c,w-c}$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی بین سطح آب-شور و سطح پوشش دایره‌ای، وات بر متر مربع-کلوین
K	ضریب هدایت حرارتی، وات بر متر-کلوین
L_{gap}	فاصله‌ی بین کف ظرف آب شور و پوشش، متر
L_w	سطح آب، میلی‌متر
\dot{m}	نرخ تولید آب شیرین، کیلوگرم بر مترمربع در ثانیه
P	فشار، کیلوپاسکال
R_c	شعاع پوشش دایره‌ای، میلی‌متر
R_{it}	شعاع داخلی ظرف آب‌شور، میلی‌متر
Ra	عدد رایلی، -
T	درجه حرارت، کلوین

آن، در حالت‌های بهینه شده‌ی قبل انجام گرفته است. بنابراین با ثابت بودن حداکثر فاصله‌ی بین کف ظرف آب و بالای پوشش دایروی، تغییرات در شعاع پوشش دایره‌ای، انجام گرفته است. شکل ۱۵ نحوه‌ی تغییرات نرخ تولید آب شیرین را در شعاع‌های مختلف پوشش دایره‌ای نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد با افزایش شعاع پوشش از ۶۴/۵ تا ۷۰ میلی‌متر، نرخ تولید کاهش، با افزایش آن از ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر نرخ تولید افزایش و با افزایش مجدد آن از ۸۰ تا ۹۰ میلی‌متر نرخ تولید آب شیرین توسط آب‌شیرین کن کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر تولید در شعاع پوشش برابر ۸۰ میلی‌متر به‌دست آمده است که این نقطه می‌تواند نقطه‌ی بهینه‌ی شعاع پوشش دایره‌ای به‌منظور داشتن حداکثر نرخ تولید آب شیرین در نظر گرفته شود.



شکل ۱۵- مقدار تولید آب شیرین کن در شعاع‌های مختلف پوشش دایره‌ای و در $T_H=63.5^\circ C$ و $T_L=59^\circ C$

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به شبیه‌سازی عددی جریان سیال داخل محفظه‌ی آب‌شیرین کن خورشیدی لوله‌ای با در نظر گرفتن شرایط هوای مرطوب داخل آن به‌منظور محاسبه‌ی نرخ تولید آب شیرین توسط آب‌شیرین کن، بررسی تأثیر هندسه‌ی ظرف آب‌شور بر تولید و همچنین بهسازی ابعاد

α	ضریب نفوذ حرارتی، متر مربع بر ثانیه	t_f	ضخامت تگار، میلی‌متر
μ	ویسکوزیته دینامیکی (مطلق)، کیلوگرم بر متر در ثانیه	u	مولفه‌ی سرعت سیال در راستای افق، متر بر ثانیه
δ	فاصله‌ی متوسط بین سطح آب شور و سطح پوشش، متر	v	مولفه‌ی سرعت سیال در راستای عمود، متر بر ثانیه
		Wd	عمق آب‌شور داخل ظرف آب‌شور، میلی‌متر
		w	کسر جرمی، -
		x	محور افقی مختصات، متر
		y	محور عمودی مختصات، متر
زیر نویس‌ها			
$cond$	تقطیر		
$evap$	تبخیر		
H	سطح گرم (آب‌شور)		
L	سطح سرد (پوشش دایره‌ای)		
T	خاصیت حرارتی		
O	شرایط کاری		
		علائم یونانی	
		ρ	چگالی، کیلوگرم بر متر مکعب
		β	ضریب انبساط، یک بر کلون
		ν	ویسکوزیته سینماتیکی، متر مربع بر ثانیه

مراجع

- [1] Abu-Arabi, M., Zurigat, Y., Al-Hinaib, H. (2002). "Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling". Desalination (Elsevier), Vol. 143, pp. 173-182.
- [2] Ahsan, A., Fukuhara, T. (2010). "Mass and heat transfer model of tubular solar still". Solar Energy (Elsevier), Vol. 84, pp. 1147-1156.
- [3] Balan, R., Chandrasekaran, J., Shanmugan, S., Janarthanan, B., Kumar, S. (2011). "Review on passive solar distillation". Desalination and Water Treatment (Taylor&Francis Online), Vol. 28, pp. 217-238.
- [4] Florides, G.A., Tassou, S.A., Kalogirou, S.A., Wrobel, L.C. (2002). "Review of solar and low energy cooling technologies for buildings". Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier), Vol. 6, pp. 557-572.
- [5] Zhai, X.Q., Wang, R.Z., Dai, Y.J., Wu, J.Y., Xu, Y.X., Ma, Q. (2007). "Solar integrated energy system for a green building". Energy Building (Elsevier), Vol. 39, pp. 985-993.
- [6] Raithby, G.D., Hollands, K.G.T. (1985). "Handbook of heat transfer fundamentals (2rd ed.)". Mc Graw Hill, New York, USA.
- [7] Patankar, S.V. (1980). "Numerical heat transfer and fluid flow, series in computational methods in mechanics and thermal sciences". Mc Graw Hill, New York, USA.
- [8] Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method". Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [9] Rahman, M.M., Öztop, H.F., Ahsan, A., Kalam, M.A., Varol, Y. (2012). "Double-diffusive natural convection in a triangular solar collector". International Communications in Heat and Mass Transfer (Elsevier), Vol. 39, pp. 264-269.
- [10] Islam, K.M.S., Fukuhara, T., Asano, F. (2004). "Mass transfer in tubular solar still". Proceedings of the 59th Annual Conference, JSCE, Nagoya, Japan, pp. 236-237.
- [11] Islam, K.M.S., Fukuhara, T. (2005). "Heat and mass transfer in tubular solar still under steady condition". Annual Journal of Hydraulic Engineering (JSCE), Vol. 49, pp. 727-732.
- [12] Murase, K., Tobata, H., Ishikawa, M., Toyama, S. (2006). "Experimental and numerical analysis of a tube-type networked solar still for desert technology". Desalination (Elsevier), Vol. 190, pp. 137-146.
- [13] Islam, K., Fukuhara, T. (2007). "Production analysis of a tubular solar still". Doboku Gakkai Ronbunshuu B, Vol. 63, pp. 108-119.
- [14] Ahsan, A., Islam, K.M.S., Fukuhara, T., Ghazali, A.H. (2010). "Experimental study on evaporation, condensation and production of a new tubular solar still". Desalination (Elsevier), Vol. 260, pp. 172-179.
- [15] Zheng, H., Chang, Z., Chen, Z., Xie, G., Wang, H. (2013). "Experimental investigation and performance analysis on a group of multi-effect tubular solar desalination devices". Desalination, Vol. 311, pp. 62-68.

- [16] Dwivedia, V.K., Tiwari, G.N. (2009). "Comparision of internal heat transfer coefficients in passave solar stills by diffrent thermal models: an experimental validation". *Desalination (Elsevier)*, Vol. 246, pp. 314-318.
- [17] Cengel, Y.A. (2006). "Heat and mass transfer: a practical approach (3rd ed.)". Mc Graw Hill, New York, USA.
- [18] Ostrach, S. (1988). "Natural convection in enclosures". *Journal of Heat Transfer (ASME)*, Vol. 110, pp. 1175-1190.
- [19] Sampathkumar, K., Arjunan, T., Pitchandi, P., Senthikumar, P. (2010). "Active solar distillation-a detailed review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier)*, Vol. 14, pp. 1503-1526.