

مقاله علمی - پژوهشی

تحلیل حرارتی جاذب سامانه نمک‌زدایی سهموی خورشیدی با کانون نقطه‌ای

به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

جواد اشرفی^۱، شیوا گرجیان^{۲*} و و برات قبادیان^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۱

چکیده

متمركزکننده‌ها کارکردهای بسیاری دارند که یکی از آنها استفاده در فرآیند نمک‌زدایی از آب شور به روش تبخیر و تقطیر است. به دلیل وجود حرارت بالا در جاذب متمركزکننده‌ها، این امکان فراهم می‌شود تا با طراحی یک سامانه مبدل حرارتی، زمینه تبخیر آب شور به وجود آید. در این پژوهش سعی شد تا به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) دو هندسه جاذب ماریپیچی و استوانه‌ای بررسی شوند. برای این منظور، سیال عامل بر اساس ویژگی‌های آب شور دریا در نرم‌افزار Fluent Ansys تعریف شد و ایجاد هندسه و تحلیل حرارتی بر اساس شرایط اولیه و مرزی سامانه در نظر گرفته شدند. با بررسی نتایج اعتبارسنجی کیفیت شبکه‌بندی، شبکه بهینه در هر دو هندسه المان مربعی مربعی شکل بود. تحلیل حرارتی جاذب نشان داد که در هندسه استوانه‌ای، توزیع حرارتی در کف هندسه بیشتر است تا در سطح بالایی آن. نتایج تحلیل تغییرات عدد ناسلت، تمركز تنش حرارتی را در مقطع خروجی سیال نشان دادند. با این همه، و برخلاف هندسه استوانه‌ای، توزیع حرارت در هندسه ماریپیچ به طور یکنواخت، متقارن و بدون تمركز تنش حرارتی بود. این تمركز تنش در هندسه استوانه‌ای موجب می‌شود تا احتمال انتقال فرآیند تبخیر از داخل محفظه به لوله‌های انتقال به وجود آید. مقایسه نتایج تحلیل عددی رفتار حرارتی در دو هندسه جاذب نشان داد که مزیت هندسه ماریپیچ در یکنواختی توزیع حرارت است که باعث افزایش بازده حرارتی در فرآیند نمک‌زدایی می‌شود. در مقابل، مزیت هندسه استوانه‌ای در طراحی ساده، جایگذاری آسان، عایق‌بندی سریع و استفاده از مواد قابل دسترس برای ساخت نسبت به هندسه ماریپیچ است.

واژه‌های کلیدی

جاذب کانونی، سامانه تقطیر، متمركزکننده خورشیدی، مطالعه عددی

مقدمه

۷۰ درصد مناطق آن خشک یا نیمه‌خشک است. در حال حاضر ایران با بحران آب مواجه است و منبع اصلی آب، بارش سالیانه است. ولی بیشتر مناطق ایران بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال دارند. در دهه‌های اخیر، تغییرات آب و هوایی و نبود برنامه جامع برای بهره‌مندی از آب تأثیر منفی بر منابع آبی کشور گذاشته، بروز خشکسالی و سیل

امروزه کمبود آب آشامیدنی و چگونگی تأمین آن یکی از مسائل مهم و اساسی کشورهای مختلف جهان است. موضوع تأمین آب آشامیدنی پژوهشگران بسیاری را در سرتاسر جهان واداشته است تا به توسعه سامانه‌های نمک‌زدایی بپردازند. ایران در کمربند خشک جهان قرار گرفته است، نزدیک به

میسمی و همکاران (Mismi *et al.*, 2008) دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده‌ای را ابداع کردند که از الیاف کفنی در ساختمان آن استفاده شده بود. در پژوهش‌های این محققان سعی شده بود که تمامی اجزای دستگاه آب‌شیرین‌کن با مختصر-ترین هزینه و به ساده‌ترین شکل قابل تهیه باشند. در دستگاه ساخته شده، آب شور وارد دستگاه می‌شود و به دلیل خاصیت موینگی الیاف کفنی، شروع به بالا آمدن از مخزن می‌کند. آب شور در حین بالا آمدن توسط الیاف کفنی، تبخیر می‌شود و در محفظه شیشه‌ای میعان پیدا می‌کند و تبدیل به آب خالص می‌شود. پژوهشگران مهم‌ترین مزیت این دستگاه را حجم کم و در نتیجه کاربری راحت آن دانسته‌اند.

واینر و همکاران (Weiner *et al.*, 2015) سامانه RO-MED هیبریدی را توسعه و گزارش دادند که این سیستم هیبریدی می‌تواند کارآمدتر از سیستم تقطیر چندگانه (MED)^۱ مستقل فعلی کار کند و نسبت بازیابی بیشتری از سیستم RO^۲ مستقل فعلی دارد و هزینه‌های انرژی و دفع را کاهش می‌دهد. با استفاده از یک مزرعه حرارتی متمرکز^۳ (CSP)، هم کار و هم گرمای تجدیدپذیر را می‌توان بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای تأمین کرد. برای یک عملیات از راه دور این محققان می‌گویند با استفاده از سیستم توسعه‌یافته، هزینه یکسان‌سازی آب در مقایسه با روش مرسوم بیش از ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. سیستم MED برای به حداقل رساندن هزینه یکسان شده آب، به کارگیری پنج اثر MED و اجرای هر دو مرحله RO با شار متوسط ۱۸/۲ لیتر در مترمربع پیشنهاد شد. استابر و همکاران (Stuber *et al.*, 2015) یک سامانه نمک‌زدایی خورشیدی برای

را در پی داشته است. تغییرات آب و هوایی و نبود برنامه جامع به منابع آبی خسارات بزرگی وارد و مدیریت این منابع را در کشور با مشکل مواجه کرده است (Gorjian & Ghobadian, 2015). به دلیل اهمیت حیاتی آب و با توجه به اینکه انرژی خورشیدی به عنوان منبعی رایگان در بیشتر نقاطی که نیاز به نمک‌زدایی آب شور دارند در دسترس است، تلفیق سامانه‌های نمک‌زدایی آب شور و منبع تأمین توان خورشیدی یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای تولید غیرمتمرکز آب شیرین است (Guderzi & Hoseinzadeh, 2014).

نمک‌زدایی خورشیدی فناوری جداسازی نمک از آب با استفاده از انرژی خورشیدی است. دو روش اصلی برای نمک‌زدایی با این فناوری وجود دارد: مستقیم و غیرمستقیم. در روش مستقیم، از یک جمع‌کننده خورشیدی و یک سامانه تقطیر استفاده می‌شود و فرایند نمک‌زدایی در یک چرخه ساده طی می‌شود. در نمک‌زدایی خورشیدی به روش غیرمستقیم مانند روش اسمز معکوس و فتوولتائیک (PV-RO) دو سامانه مجزا به کار گرفته می‌شود: الف) یک آرایه جمع‌کننده خورشیدی شامل جمع‌کننده‌های گرمایی بر پایه سیال و فتوولتائیک و ب) یک مجتمع تقطیر معمولی مجزا. در سامانه تقطیر خورشیدی حوضچه‌ای و در ساده‌ترین شکل، آب دریا یا آب شور داخل حوضچه سامانه گرم و با بالا رفتن دما، بخار آب ایجاد می‌شود. بخار آب پس از برخورد به سطح داخلی سرپوش که دمای آن تا حدی پایین است، شروع به تقطیر می‌کند. با جمع‌آوری این قطره‌های آب، آب شیرین به دست می‌آید. پیشینه پژوهش‌های مرتبط با این نوع فناوری به صورت زیر است.

1- Multi-Effect Distillation

2- Reverse Osmosis

3- Concentrating Solar Power

(Muñoz *et al.*, 2020) برای به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی در گلخانه‌هایی که نیازمند به آبیاری هستند و همچنین برای به حداقل رساندن هزینه دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی، از اینترنت اشیا برای مدیریت یک شبکه هوشمند از جمله تأسیسات تقطیر غشایی خورشیدی برای آبیاری چندین خانه سبز، بر اساس معماری استاندارد Fiware استفاده کردند. محمود و الانصاری (Mahmood & Al-Ansari, 2021) یک گلخانه جدید با انرژی خورشیدی خود پایدار، با استفاده از پدیده رطوبت‌زدایی (HDH)^۱ برای نمک‌زدایی، توسعه دادند و تجزیه و تحلیل کردند. گلخانه پیشنهادی در مناطق دارای آب و هوای خشک و آب‌های زیرزمینی شور، از یک واحد گلخانه خورشیدی، PTC^۲ها، ذخیره انرژی حرارتی، چرخه رانکین آلی و یک سیستم خنک‌کننده جذبی تشکیل شده بود. در این مطالعه، یک مدل ترمودینامیکی بر اساس جرم، آنروپی، انرژی و انرژی هم‌اجزای تشکیل‌دهنده سیستم توسعه داده شد و عملکرد سیستم بهبود یافت. هیپولیتو-والنسیا و همکاران (Hipólito-Valencia *et al.*, 2021) روبنای جدیدی فرموله شده را به عنوان یک مدل چند هدفه پیشنهاد کردند که در آن یک بخار مجهز به چرخه Rankin از سوخت‌های فسیلی و انرژی خورشیدی برای تأمین نیازهای برق فرآیند نمک‌زدایی و فعالیت کشاورزی تغذیه می‌شد. میزان صرفه‌جویی در مصرف برق زیرزمینی و خارجی به ترتیب حدود ۶۶/۱۲ درصد و ۸۶/۲ درصد به دست آمد.

بررسی اغلب تحقیقات روی گلخانه‌ها و امانه های تقطیر خورشیدی به گونه‌ای بوده است که اشاره به پتانسیل بالای سامانه‌های خورشیدی برای

تصفیه بازیابی بالای آب‌های زهکشی زیرسطحی کشاورزی و همچنین سایر موارد منابع آب زیرزمینی شور به عنوان یک استراتژی استفاده مجدد طراحی کردند. در این مورد، یک چرخه باز، پمپ حرارتی جذب بخار با یک سیستم MED و یک سیستم بزرگ متمرکزکننده سهموی (PTC)^۱ ادغام شدند. عملکرد تقطیر بدون پمپ حرارتی، مصرف انرژی حرارتی را ۲۶۱/۸۷ کیلووات ساعت بر مترمکعب نشان داد و از نتایج عملکرد انرژی حرارتی، ۳۴/۹ کیلووات ساعت بر مترمکعب برای یک طراحی بهینه با ۸۵ درصد بازیابی یک سامانه MED به دست آمد.

روکا و همکاران (Roca *et al.*, 2016) از یک سامانه MED خورشیدی را برای تولید آب شیرین، برای آبیاری زمین‌های کشاورزی شبیه‌سازی کردند. این محققان از یک سامانه کنترل در یک نیروگاه MED خورشیدی برای تأمین تقاضای آب آبیاری یک گلخانه، نصب شده در اسپانیا، استفاده کردند. چالش، عملکرد مناسب کارخانه آب‌شیرین‌کن برای تأمین نیاز آبی روزانه محصولات کشت شده در داخل گلخانه بود. در این مورد، یک کنترل‌کننده سلسله مراتبی برای کاهش هزینه آب تولید شده توسط کارخانه نمک‌زدایی خورشیدی، با حفظ حجم تقطیر پیشنهاد شد. برای آبیاری گلخانه، محققان دریافتند که طرح کنترل پیشنهادی می‌تواند تقاضای آب، کاهش هزینه‌های برق خورشیدی و ذخیره بیشتر انرژی حرارتی در سیستم ذخیره‌سازی را اطمینان‌بخش کند. مدل‌های توسعه‌یافته برای تقاضای آب و سیستم‌های تولید می‌توانند کلید دستیابی به قیمت‌های رقابتی‌تر تقطیر، هنگامی که کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی مدل اعمال می‌شوند، باشند. مونوز و همکاران

1- Parabolic Through Concentrator

2- Humidification-dehumidification

3- Parametric Technology Corporation

حجم کنترل و در گام‌های زمانی^۴ مشخص شده حل می‌شوند. روابط ۱، ۲ و ۳ بیان‌گذار معادلات پیوستگی، تکانه (فرم همرفتی) و انرژی را نشان می‌دهند. فرض اصلی حل مسئله در هندسه^۱ استوانه‌ای انتقال حرارت همرفتی- جابه‌جایی و در هندسه^۲ مارپیچی حل بر اساس رویکرد مبدل حرارتی است. برای حل معادلات سیالاتی در حالت گسسته، فرض شده است که خواص جریان سیال تراکم‌ناپذیر و نیوتنی است. به دلیل حرکت جریان سیال در لوله^۳ سرپوشیده عدد رینولدز برای دسته‌بندی الگوی جریان سیال محاسبه شد. بنابر نتایج به دست آمده، فرض گردید که دامنه^۴ تغییرات سرعت جریان به صورتی است که در الگوی رفتاری آرام دسته‌بندی می‌شود ($Re < 2400$). دقت حل ۰/۰۱ فرض گردید. همچنین فرض مرتب با سطح بیرونی هر دو هندسه بدین صورت بود که شرط شار حرارتی صفر و شرایط حل مستقل از اثر عوامل محیط بیرونی است.

جایگزینی با سامانه‌های متداول تولید انرژی داشته است. توانمندی اصلی این سامانه‌ها تبدیل انرژی حرارتی خورشیدی به دیگر شکل‌های انرژی مورد نیاز در عرصه‌های کشاورزی و کشت گلخانه‌ای است و قسمت جاذب حرارتی دستگاه اصلی‌ترین جزء آن محسوب می‌شود. بررسی تحقیقات این نتیجه را به دست می‌دهد که افزایش بازده حرارتی سامانه در گرو ارائه^۱ تحلیلی دقیق از رفتار حرارتی جاذب است. تحلیل توزیع انتقال حرارت، تغییرات شار حرارتی و ضریب‌های بی بعد به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند دید دقیقی را از رفتار حرارتی جاذب ارائه دهد. بنابراین، ضرورت دارد تا مطالعه‌ای با رویکرد شبیه‌سازی سه بعدی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به منظور تحلیل رفتار حرارتی جاذب سامانه تقطیر خورشیدی به مرحله^۲ اجرا درآید.

مواد و روش‌ها

هدف‌های این پژوهش متمرکز بر شبیه‌سازی سامانه^۱ جاذب متمرکزکننده سهموی بشقابی خورشیدی به منظور اجرای فرآیند نمک‌زدایی است. بنابراین، برای ورود به مراحل شبیه‌سازی در ابتدا باید الزام‌های حل عددی مد نظر قرار گیرند. با توجه به رویه عمومی شبیه‌سازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی، روش کلی حل بر اساس کنترل حجم^۱ است و سعی در استخراج توزیع حرارتی سطح جاذب در حین چرخش سیال عامل در داخل آن است. با توجه به اینکه توزیع حرارتی در سطح جاذب تحت تأثیر زمان است، بنابراین معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی باید در حالت گذرا^۲ و به صورت گسسته^۳ حل گردند. معادلات بیان شده روی هر

$$\frac{\partial \rho_{(x,y,z)}}{\partial t} + \nabla(\rho_{(x,y,z)} \cdot u_{(i,j,k)}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial[\left(\frac{\mu}{Pr}\right) \frac{\partial T}{\partial x_j}]}{\partial x_j} \quad (3)$$

که در آنها،

$\rho_{(x,y,z)}$ = چگالی جریان سیال در مختصات دکارتی؛ $u_{(i,j,k)}$ و v_j = بردار سرعت جریان سیال در راستاهای مختلف؛ τ_{ij} = تنش برشی لایه‌های سیال؛ b_i = شتاب گرانشی؛ μ = ویسکوزیته جریان سیال؛ Pr = پارامتر فشار؛ و T = دمای جریان سیال.

1- Control volume

3- Discrete

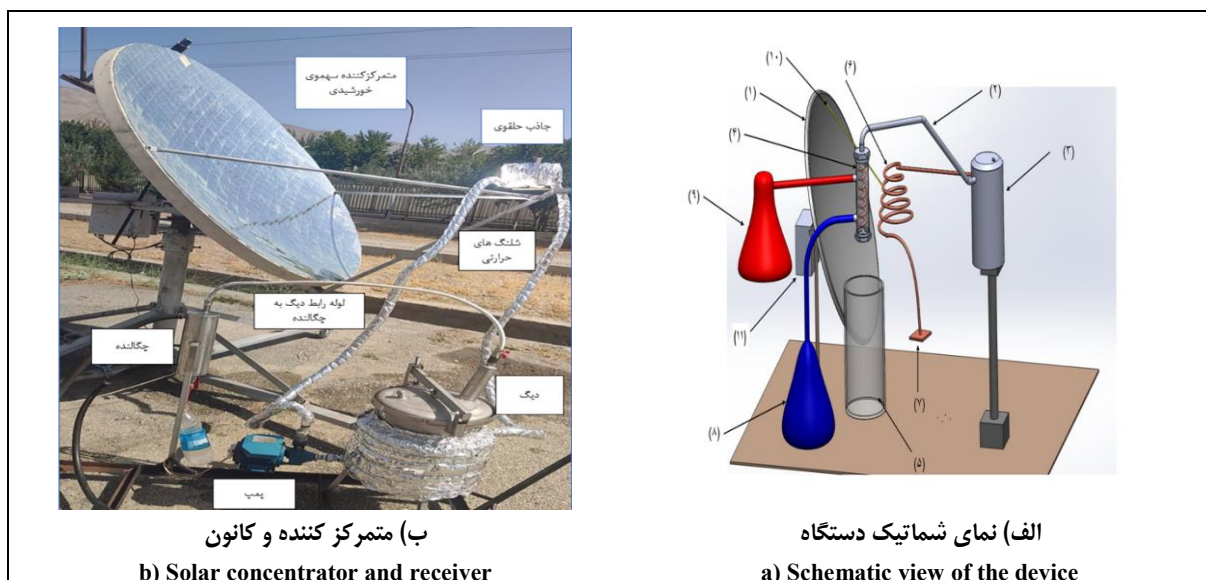
2- Transient

4- Time step

ستاپ مورد آزمون

برای اجرای دقیق فرآیند حل عددی، نیاز است تا اطلاعات و شکل سامانه مورد ارزیابی به دقت بیان شود. سامانه تقطیر خورشیدی متشکل است از متمرکزکننده سهموی بشقابی به منظور تأمین حرارت سامانه و سایر تجهیزات پیرامونی آن اعم از دیگ بخار، چگالنده، لوله‌های انتقال حرارت، شیلنگ‌های اتصال و سر شیلنگ. در این روش، حرارت مورد نیاز توسط متمرکزکننده خورشیدی تأمین می‌شود. ردیاب دوماحوره باعث می‌شود تا

متمرکزکننده خورشیدی مسیر حرکت خورشید را در سراسر روز دنبال کند تا بیشترین انرژی گرمایی را از خورشید دریافت کند. برای تشخیص زاویه‌های تابش، از سنسور نوری در قسمت کلکتور سهموی استفاده شد که توانایی این را دارد تا انرژی گرمایی با بازده مناسب را توسط کلکتور سهموی در نقطه کانونی جمع کند و گرمای موجود در نقطه کانونی باعث گرم شدن روغن موجود در لوله انتقال حرارت شود و این روغن حرارت دیده به دیگ انتقال یابد. شکل ۱ ستاپ مورد آزمون را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سامانه تقطیر خورشیدی

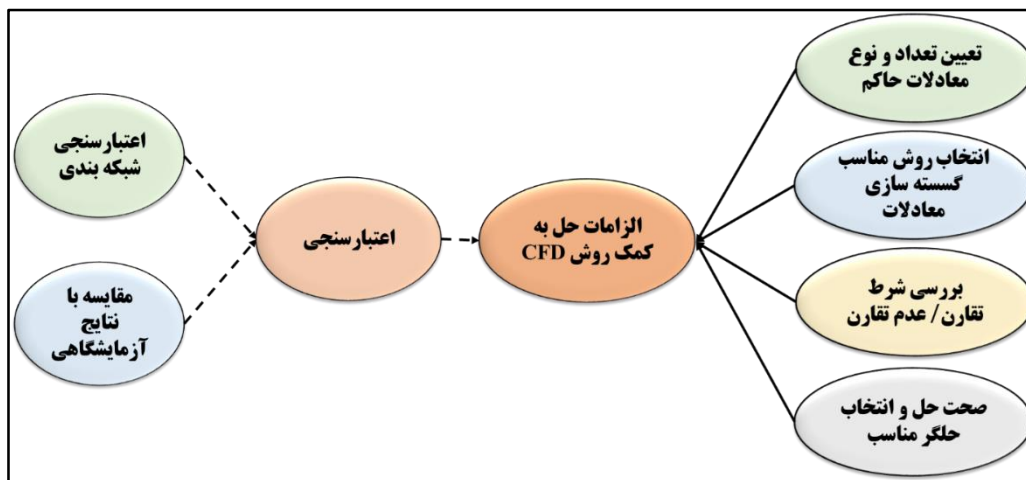
(۱) متمرکزکننده سهموی خورشیدی، (۲) لوله‌های رابط دیگ به چگالنده، (۳) دیگ، (۴) چگالنده، (۵) ظرف حاوی محصول نهایی، (۶) لوله انتقال حرارت، (۷) پمپ روغن، (۸) ورودی آب سرد به چگالنده، (۹) خروجی آب گرم از چگالنده، (۱۰) پرتو خورشید و (۱۱) دستگاه ردیاب خورشید

Fig. 1- Schematic of solar Distillation system

1) Parabolic solar concentrator 2) Boiler connection pipeline 3) Boiler 4) Condenser 5) Final product collection tank 6) Heat transfer stream 7) Oil pump 8) Cold water inflow stream to condenser 9) Hot water outflow stream from condenser 10) Solar radiation concentrator 11) Sun tracker

دارد، یکی اعتبارسنجی شبکه‌بندی میدان حل و دیگری اعتبارسنجی یک یا چند پارامتر خروجی حل عددی با نتایج آزمایشگاهی. شکل ۲ کلیه الزام‌های حل عددی مبتنی بر روش CFD را نشان می‌دهد.

یکی از الزام‌های مهم در فرآیند حل عددی، اعتبارسنجی نتایج حل است. به طور کلی نتایج حل عددی باید توسط آزمایش‌های معتبر به دست آیند. به طور معمول، اعتبارسنجی حل عددی دو مرحله



شکل ۲- الزام‌های حل عددی مبتنی بر CFD

Fig. 2- Numerical analysis procedure based on CFD

مسئله سعی شد تا طراحی در محیط Design modeler عملی شود. در شکل اول ابعاد ساده‌سازی شده شکل جاذب بر اساس پژوهش گرجیان (Gorjian, 2013) رسم گردید. جدول ۱ ابعاد هندسی نمونه ترسیم شده را بیان می‌کند.

مرحله پیش پردازش بر اساس روش مرسوم برای حل مسائل به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، در ابتدا هندسه میدان حل در نرم‌افزار ANSYS V.2019 b رسم شد. به دلیل سادگی هندسه میدان حل در این

جدول ۱- ویژگی‌های هندسی جاذب استوانه‌ای

Table 1- Geometrical features of the cylindrical absorber

1.8	Aperture diameter (m)	قطر دهانه (متر)
1.35	Focal point (m)	فاصله کانونی (متر)
0.15	Height (m)	ارتفاع (متر)
2.61	Absorber surface area (m^2)	مساحت سطح جاذب (مترمربع)
2.54	Absorber aperture surface area (m^2)	مساحت سطح دهانه جاذب (مترمربع)

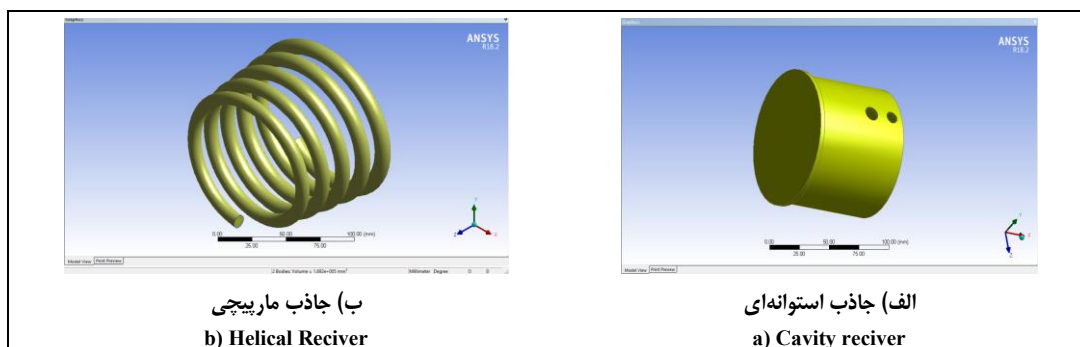
در هندسه دوم سعی شد تا جاذب به شکل یک نمونه مبدل حرارتی لوله‌ای مارپیچی رسم گردد. جدول ۲ پارامترهای مشابهت‌سازی شده بین دو طراحی را برای هندسه مبدل مارپیچی بیان می‌کند. به منظور ایجاد مشابهت بین دو شکل ترسیمی، دو پارامتر قطر دهانه و

مساحت سطح دهانه جاذب مد نظر قرار گرفتند. عبور جریان سیال عامل از لایه مرکزی شکل مارپیچی و اعمال شرط حرارتی به پوسته بیرونی فرض مناسب برای حل عددی این هندسه است. شکل ۳، دو هندسه طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- ویژگی‌های هندسی جاذب مارپیچی

Table 2- Geometrical features of the helical absorber

1.8	Aperture diameter (m)	قطر دهانه (متر)
10	Steel pipes diameter (mm)	قطر لوله‌های استیل (میلی‌متر)
1.2	Growth ratio of rings	نسبت رشد حلقه‌ها
5	Number of rings	تعداد حلقه‌ها
2.61	Concentrator surface area (m ²)	مساحت سطح متمرکزکننده



شکل ۳- هندسه‌های طراحی شده برای بیان شرایط متمرکزکننده

Fig. 3- Designed geometry with ANSYS DESIGN modeler

برای شبکه‌بندی میدان حل باید تقارن ابعادی هندسه و محل ورودی و خروجی سیال عامل مد نظر قرار گیرند. بدین‌صورت که در هر دو هندسه تقارن ابعادی رعایت شود تا بتوان شبکه‌بندی منظم را روی هندسه اعمال کرد. اندازه شبکه باید در مقاطع ورود و خروج سیال عامل ریزتر در نظر گرفته شود. به طور معمول، معیار انتخاب نوع المان شبکه‌بندی، منظم بودن، شرایط ورود و خروج جریان سیال و اهمیت مقطعی است که لازم است معادلات جریان در آن حل گردد. در همین راستا، ویژگی نرم‌افزار ANSYS در ارائه پیشنهاد نوع المان بر اساس چندین پارامتر مهندسی مختلف است. با توجه به اینکه هر دو هندسه دارای تقارن ابعادی بودند و پیشنهاد نرم‌افزار بر استفاده از المان مربعی بود، سعی شد تا از المان مربعی بهره گرفته شود. در مرحله اعمال شبکه‌بندی میدان حل، سعی شد با انتخاب روش‌های مرسوم شبکه‌بندی، نوع المان

شبکه برای بهبود شبکه‌بندی تغییر داده شود. سه شرط کلی برای سطوح هندسه‌های تولید شده در نظر گرفته شد. ورود جریان سیال به میدان حل با تعریف شرط سرعت جریان سیال^۱، خروج جریان سیال از میدان حل با تعریف شرط فشار محیط^۲ و شرط اعمال دمای جاذب بر دیواره^۳ بیرونی هندسه میدان حل. با توجه به اینکه شار حرارتی روی دیواره جاذب وابسته به تعریف معادلات تابش است و در اندازه‌گیری پارامترهای تعریف معادلات تابش محدودیت وجود داشت، سعی شد تا میزان دمای پوسته بیرونی متمرکزکننده به عنوان منبع حرارتی در ابتدای حل در نظر گرفته شود. تمام شرط‌های انتخاب شده برای اعمال به هندسه میدان حل، بر اساس انتخاب سطوح مد نظر هستند. در شکل ۴، نحوه انتخاب سطوح اعمال شروط کلی ورود و خروج سیال و دیواره میدان حل نشان داده شده‌اند. در هندسه مارپیچی، به منظور کاهش اتلاف حرارتی و

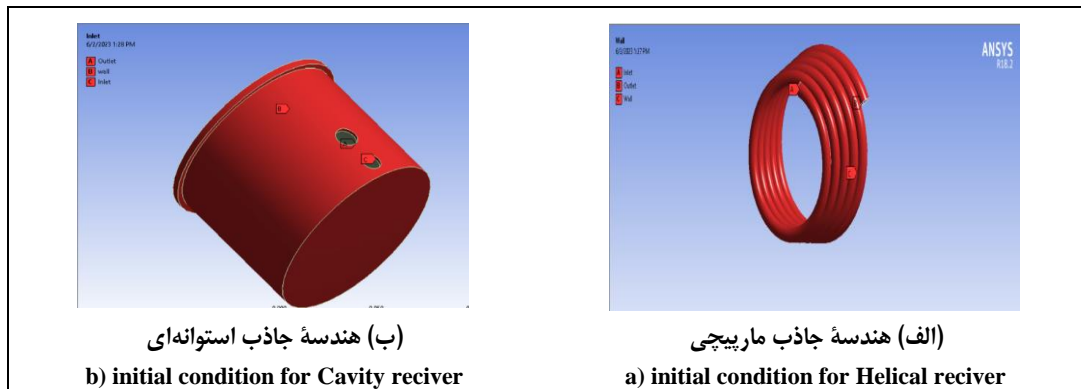
1- Velocity Inlet

2- Pressure outlet

3- Wall

ایجاد فاکتورهای اتلاف حرارتی می‌شود. تغییر آنی شرایط اولیه و مرزی میدان حل موجب شد تا رویکرد حل مسئله تحلیل رفتار حرارت جاذب بر اساس پارامترهای ناپایداری معادلات جریان باشد.

بازده انرژی، سطح بیرونی با پوشش سیاه رنگ عایق شده است. در ترسیم هندسه نیز برای رعایت شرط تقارن طولی- عرضی بین هر حلقه از ماریچها، فاصله بین آنها کمتر نشان داده شد. با وجود این، شرط شار حرارتی صفر مانع



شکل ۴- نحوه انتخاب سطوح برای اعمال شرطهای کلی ورود و خروج سیال و دیواره میدان حل

Fig. 4- Surface selection for define initial condition in whole domain

در حالت آرام است. از این‌رو، استفاده از مدل جریان سیال آرام^۱ می‌تواند برای توجیه پروفیل سرعت جریان سیال و حل معادلات پیوستگی و تکانه به کار گرفته شود. پمپ مورد استفاده در این پژوهش از نوع دبی ثابت و برای کل شیلنگ‌های فشار قوی و دما بالا و کل اتصالات به کار رفته در مدار گردش سیال، با ارتفاع پمپاژ ۴ متر و توان مورد نیاز کمتر از ۰/۵ اسب بخار انتخاب گردید. پمپ مورد نظر دارای توان نامی ۰/۵ اسب بخار و ارتفاع پمپاژ ۳/۵ متر و با دبی سیال ۲/۴ مترمکعب بر ساعت است. برای تعریف ویژگی‌های سیال عامل در دو هندسه از نتایج پژوهش گرجیان (Gorjian, 2013) استفاده شد. بنابراین، سیال عامل تعریف شده دارای ویژگی‌های فیزیکی و ضریب‌های حرارتی منطبق بر آب دریاست. جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی و گرمایی سیال عامل (آب دریا) را بیان می‌کند.

مرحله پردازش

مرحله پردازش میدان حل در این مسئله شامل تعریف شرایط عمومی حل، تعریف مدل‌ها و معادلات حاکم بر میدان حل، تعیین مواد و ویژگی‌های فیزیکی سیال عامل، تعریف شرایط اولیه و مرزی میدان حل، تعیین شرایط حلگر عددی و مرتبه گسسته‌سازی، مقداردهی اولیه، تعیین گام‌های زمانی و تعداد تکرار حل در هر گام است. بیان این نکته بسیار بااهمیت است که به دلیل وجود شرط زمانی برای اثرگذاری چشمه حرارتی بر کل پوسته هندسه، مسئله به صورت گذرا حل می‌شود. از این‌رو، مدل‌هایی که برای تعیین توزیع انتقال حرارت و پروفیل جریان سیال تعریف می‌شوند شامل مدل جریان آرام سیال و معادله انرژی در حالت گذراست. محاسبه سرعت خطی جریان سیال نشان داد که رفتار جریان سیال در لوله سر بسته غیر مغشوش و

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و گرمایی سیال عامل (Gorjian, 2013)

Table 3- Thermophysical properties of working fluid (Gorjian, 2013)

آب دریا	ویژگی‌های فیزیکی - گرمایی	
1026.9	Density (at 25°C, $\frac{kg}{m^3}$)	چگالی
976.3	Specific heat ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$)	گرمای ویژه
100.7	Boiling point (at 1 atm, 25°C)	نقطه جوش
2155.294	Latent heat of evaporation ($\frac{kJ}{kg}$)	گرمای نهان تبخیر

$$Q = Av \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \pi \approx 3$$

مجرای انتقال سیال عامل با قطر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. بنابراین سرعت خطی جریان سیال در حدود ۰/۶۶۷ متر بر ثانیه به دست می‌آید. میزان تخلیه آب شور از خروجی جریان سیال به محیط فرض شده در فشار محیط ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. به کمک دماسنج لیزری، حرارت دیواره جاذب‌ها به دست آمد. اندازه‌گیری چندین بار تکرار شد تا حد بهینه و پایدار حرارت دیواره جاذب‌ها بر اساس کارکرد صحیح سامانه به دست آید نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که کارکرد صحیح و پایدار نمک‌زدایی زمانی به حد قابل قبول می‌رسد که لایه بیرونی جاذب‌ها دارای دمایی در حدود ۳۴۶/۸۵ درجه سلسیوس باشد. بنابراین، شرط دمایی شروع حل برای اعمال چشمه حرارتی به دیواره‌های بیرونی جاذب‌ها ۳۴۶/۸۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. جدول ۴، شرایط اولیه و مرزی میدان حل را برای تمامی سطوح جاذب‌ها بیان می‌کند.

با توجه به اینکه در هندسه مارپیچی رویکرد حل بر اساس انتقال حرارت در مسائل مبدل‌های پوسته‌ای - لوله‌ای^۲ است، مقطع عبور سیال عامل در لایه درونی آن تعریف گردید و پوسته بیرونی آن به صورت جامد و بر اساس خواص استیل تعریف شد. جاذب استوانه‌ای نیز از جنس فایبرگلاس با دو پوشش تفلون سبز و سیاه در درون و بیرون آن به منظور جلوگیری از خوردگی و ایجاد حداکثر شرایط جذب پوشش داده شد. تعریف شرایط اولیه و مرزی میدان حل بر اساس سرعت ورود جریان سیال عامل و همچنین شرط چشمه حرارتی اعمال شده بر پوسته جاذب‌ها بیان شد. بر اساس اندازه‌گیری‌ها، میزان ظرفیت پمپاژ آب شور در حدود ۳ لیتر بر دقیقه است که به کمک رابطه آهنگ جریان حجمی می‌توان سرعت خطی جریان سیال را به دست آورد. رابطه ۴ نحوه تبدیل آهنگ حجمی تغذیه پمپ به سرعت خطی را با فرض ثابت بودن سطح مقطع مجرای انتقال سیال عامل بیان می‌کند.

جدول ۴- شرط اولیه و مرزی برای حل مسئله به روش CFD

Table 4- Determined boundary and initial condition for CFD solution

شرط اولیه	شرط مرزی	سطح مورد نظر / نوع شرط
26.85 °C	0.667 m/s	ورودی جریان سیال / velocity inlet
66.85°C	1 atm	خروجی جریان سیال / Pressure outlet
346.85 °C	Isentropic	دیواره خروجی / Wall

بر اساس شرایط حل مسئله، الگوریتم گسسته-سازی معادلات به روش SIMPLE در نظر گرفته شد و مرتبه محاسبه خطا و باقیمانده حل گذرا پس از هر گام زمانی مرتبه دوم ضمنی^۱ منظور گردید. جدول ۵، مرتبه محاسبه باقیمانده گرادیان سرعت سیال، فشار، معادله تکانه و انرژی را بیان می‌کند.

جدول ۵- الگوریتم گسسته‌سازی معادلات و نحوه محاسبه خطای باقیمانده

Table 5- Discretization algorithm for equations and residual error calculation method

SIMPLE/Second order implicit	الگوریتم گسسته‌سازی معادلات، محاسبه باقیمانده حل گذرا	
Least squares cell based	گرادیان سرعت سیال	
Second order	Pressure	فشار
Second order upwind	Momentum	تکانه
Second order upwind	Energy	انرژی

که در آن، I_{total} = تعداد کل تکرارهای حل؛ Δt = تعداد گام‌های حل در هر تکرار^۲؛ و n_t = تعداد اندازه کل گام‌های زمانی (زمان حل پیشنهادی).
با توجه به رابطه بالا و اجرای چندین بار صحیح خطا، مقدار بهینه تکرارهای حل به دست آمد. با توجه به اینکه حد کمینه باقیمانده‌های وزنی همگرایی معادلات 10^{-6} در نظر گرفته شده بود، بنابراین برای هر تکرار حداکثر ۱۰ گام در نظر گرفته شوند.

مرحله پس پردازش

قابلیت نرم‌افزار فلونت در ارائه نتایج به صورت تصاویر سه بعدی است. یکی از مهم‌ترین نتایجی که باید برای توجیه رفتار حرارتی جاذب‌ها بررسی شود، مقدار خروجی‌های بی‌بعد است. برخی از شاخص‌های مرتبط با بازده و همچنین تبدیل حالات مختلف انتقال حرارت در سطح جاذب به کمک اعداد بی‌بعد بیان می‌گردد. به طور نمونه توانایی تغییر حالت انتقال حرارت جابه‌جایی در نزدیک دیواره به حالت رسانش یا همرفت به کمک عدد بی‌بعد ناسلت بیان می‌شود تا از این طریق شار و بازده حرارتی سامانه بر اساس تغییرات پروفیل دمایی و به صورت مصور

شرط همگرایی آن است که باقیمانده حل معادلات در هر تکرار، از مقدار مشخص شده کمتر باشد. در واقع، شرط همگرایی تعیین‌کننده انتقال نتایج حل عددی از تکراری به تکرار بعدی است. روند کاهش باقیمانده حل عددی از مقدار تعیین شده شرط توقف و اتمام روند حل محسوب می‌شود. بدین منظور که در حین حل ممکن است شرایط همگرایی به نحوی پیش برود که فرآیند حل زودتر از مقادیر پیش فرض تعیین شده به اتمام برسد. در این مسئله، مقادیر آستانه همگرایی برای حل عددی برای تمامی معادلات مقدار 10^{-6} در نظر گرفته شد. در مرحله پایانی تنظیم حل گر باید میزان زمان حل و تکرار حل در هر گام زمانی تعیین گردد. بر اساس اندازه‌گیری‌ها، به منظور رسیدن به بازده مناسب نمک‌زدایی، سیال عامل باید به مدت ۱۵ دقیقه در داخل جاذب به چرخش بیفتد تا میزان دمای آب خروجی به حدود تبخیر برسد. بنابراین، میزان کل زمان حل ۹۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در این بازه زمانی، حداقل ۱۰ گام زمانی تعیین شدند، بنابراین اندازه کل تکرارهای حل بر اساس رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$I_{total} = \Delta t * n_t \quad (5)$$

نشان داده شود. بنابر تعریف، عدد ناسلت بیانگر نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی به انتقال حرارت هدایتی در مرز سیستم است. رابطه^۶، نحوه محاسبه عدد ناسلت را بیان می‌کند.

$$Nu_L = \frac{h_c D}{k} \quad (۶)$$

که در آن،

h_c = ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی؛ D = عدد پکلت^۱؛ و k = ضریب رسانش سیال عامل.

پس از اتمام مراحل حل عددی لازم است اعتبارسنجی نتایج عملی شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره گردید، اعتبارسنجی نتایج حل در دو گام کلی رخ می‌دهد. در گام اول شبکه‌بندی میدان حل ارزیابی می‌شود و در گام دوم نتایج خروجی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. بررسی نتایج شبکه‌بندی روی هر دو هندسه بدین صورت است که برای جاذب استوانه‌ای ۵۸۰۱۲ المان و برای هندسه مارپیچ ۴۸۴۵۰۸ المان چهار وجهی بالاترین دقت و کمترین زمان حل را فراهم می‌آورد.

اعتبارسنجی شبکه‌بندی میدان حل

برای برداشتن گام اول مرحله اعتبارسنجی می‌توان از تئوری استقلال از شبکه یا بررسی معیارهای کیفیت شبکه استفاده کرد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری معیارهای کیفیت شبکه در نرم‌افزار فلوئنت دقت مناسبی دارد، بنابراین برای اعتبارسنجی صحت شبکه‌بندی میدان حل به شاخص‌های کیفی خود نرم‌افزار اتکا شده است. سه معیار کلی حداقل کیفیت تعامدی^۲، آهنگ مربعی شدن^۳ و درصد اعوجاج^۴ شبکه بیان‌کننده صحت شبکه‌بندی است. رابطه‌های ۷، ۸ و ۹ میزان کیفیت

شبکه‌بندی مناسب را بر اساس معیارهای کیفی شبکه‌بندی بیان می‌کنند. از جمله پارامترهای مهم مرتبط با کیفیت شبکه‌بندی، درصد اعوجاج است. بر اساس معیار بهینه شبکه‌بندی که مرتبط با یکنواختی ابعادی المان‌هاست، شبکه‌بندی اجرا شده با شبکه کاملاً منظم معیار مقایسه می‌شود. این فاکتور میزان شبکه‌های غیر متقاطع را به صورت آماری و بر اساس مبنای مقایسه‌ای بیان می‌کند. هرچه میزان شبکه‌بندی منظم کاهش پیدا کند، اعوجاج درصد کمتری خواهد داشت.

$$0.15 \leq \text{minimum orthogonal quality of grid} \leq 1 \quad (۷)$$

$$\text{Aspect Ratio} = w/h \quad (۸)$$

$$\text{skewness (\%)} = \frac{|\text{optimal cell size} - \text{cell size}|}{\text{optimal cell size}} * 100 \quad (۹)$$

اعتبارسنجی نتایج حل عددی

در مرحله دوم اعتبارسنجی حل لازم است بین نتایج آزمایشگاهی و حل عددی مقایسه شود. برای اجرای این مرحله، از معیار خطای نسبی نتایج استفاده می‌شود. رابطه^{۱۰} نحوه محاسبه خطای نسبی را بیان می‌کند.

$$\text{Relative Error (\%)} = \frac{|\text{Experimental result} - \text{Numerical result}|}{\text{Experimental result}} * 100 \quad (۱۰)$$

حد تغییرات خطای نسبی از مسئله‌ای به مسئله دیگر در شبیه‌سازی CFD متفاوت است. به طور عمده حد معقول خطای نسبی در مسائل مرتبط

1- Peclet number

3- Aspect ratio

3- Minimum orthogonal quality

4- Skewness

سلسیوس بوده است، کمترین دمای جاذب (۶۷۰ درجه سلسیوس) در زمان کمترین تابش دریافتی (وات بر مترمربع ۹۳۶) و دمای محیط ۱۹/۵ درجه سلسیوس قابل رویت است.

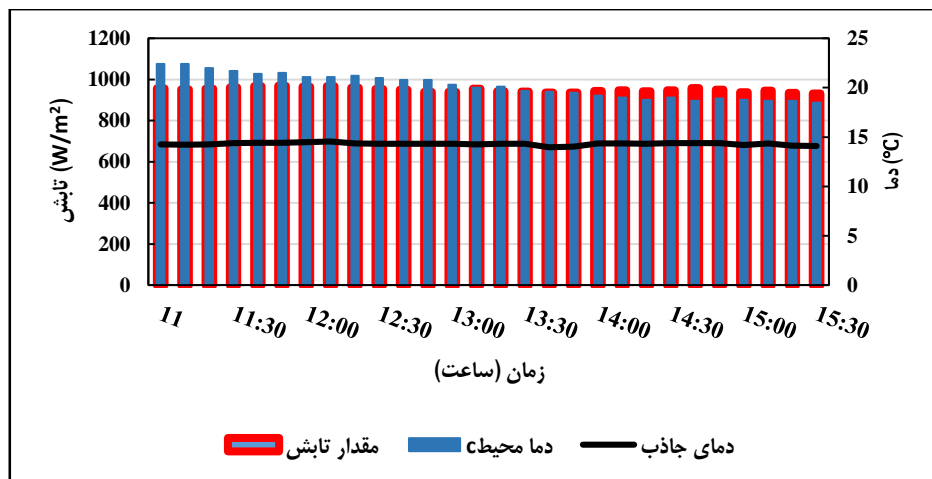
به طور میانگین، تابش دریافتی ۹۴۹/۸۶ وات بر متر مربع، دمای محیط ۲۰/۱۷ درجه سلسیوس و دمای جاذب ۶۸۶/۶۴ درجه سلسیوس است که در این مقادیر نشان‌دهنده ارتباط بیشتر عملکرد سامانه با مقدار تابش دریافتی در مقایسه با دمای محیط است. شکل ۵ نمودار تأثیر دمای محیط و تابش بر دمای جاذب را نشان می‌دهد.

با تحلیل حرارتی سامانه‌های سیالاتی بین ۱۵ تا ۲۰ درصد است.

نتایج و بحث

تحلیل و ارزیابی سامانه خورشیدی

تغییرات تابش، به دلیل داشتن سامانه ردیاب خورشیدی، و تغییرات اندک دمای هوا منجر به کم بودن تأثیر این دو پارامتر بر دمای جاذب بوده‌اند. همان‌طور که در نمودار شکل ۵ نیز می‌توان دید، بیشترین دمای جاذب (۶۹۸ درجه سلسیوس) در زمان بیشترین تابش دریافتی توسط سامانه (وات بر مترمربع ۹۶۷/۶) و دمای محیط ۲۱/۱ درجه



شکل ۵- نمودار تأثیر دمای محیط و تابش بر دمای جاذب

Fig. 5- Effect of air temperature and solar radiation on the temperature of the absorber

شدند. نتایج تغییرات شبکه‌بندی میدان حل برای جاذب استوانه‌ای نشان دادند که به کارگیری الگوریتم شبکه‌بندی خودکار با الگوریتم چهار وجهی تفاوت معنی‌داری از لحاظ معیارهای کیفیت شبکه ندارد. با تغییر هندسه شبکه به حالت شش وجهی، اغلب معیارهای کیفی دچار تفاوت معنی‌داری شدند. برای نمونه، با انتخاب المان شش‌وجهی، میزان تغییرات معیار نسبت به کشیدگی، جهش ناگهانی

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

نتایج اعتبارسنجی شبکه میدان حل بر اساس سه معیار حداقل کیفیت تعامد، حداکثر آهنگ مربعی شدن و درصد اعوجاج بررسی شد. به دلیل انتخاب روش‌های گوناگون شبکه‌بندی، معیار انتخاب شبکه بهینه در هر هندسه نزدیک بودن مقادیر معیارها به عدد ۱ بود (به جز درصد اعوجاج). بنابراین، بررسی‌ها روی هندسه میدان حل اجرا

داشته است. پس، به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که برای هندسه جاذب استوانه‌ای مناسب‌ترین شکل شبکه‌بندی چهاروجهی است و اندازه المان متوسط می‌تواند بهترین کیفیت شبکه را ارائه دهد.

در اعتبارسنجی شبکه‌بندی هندسه مارپیچی روندی مشابه هندسه جاذب استوانه‌ای بشقابی طی شد. بررسی نتایج شبکه‌بندی روی هندسه مارپیچی نشان داد که به دلیل ویژگی‌های هندسی این جاذب، تغییرات پارامترهای شبکه‌بندی در افزایش کیفیت شبکه چندان اثرگذار نیست. تنها، تغییر شکل المان‌ها در تغییر معیارهای کیفی شبکه اثرگذار است. با وجود این، کیفیت شبکه‌بندی با المان شش وجهی در هندسه مارپیچی نامناسب است. این کیفیت نامناسب باعث افزایش بی‌رویه تعداد المان‌ها شده است. بنابراین، انتخاب شبکه خودکار می‌تواند مناسب‌ترین شبکه برای جاذب مارپیچی باشد.

استوانه‌ای بشقابی باشد. دلیل این موضوع آن است که در هندسه مارپیچی فرض شده است که سیال عامل از پوسته درونی هندسه عبور می‌کند. شکل ۶ معیارهای کیفیت‌سنجی شبکه را در دو هندسه استوانه‌ای و مارپیچی نشان می‌دهد.

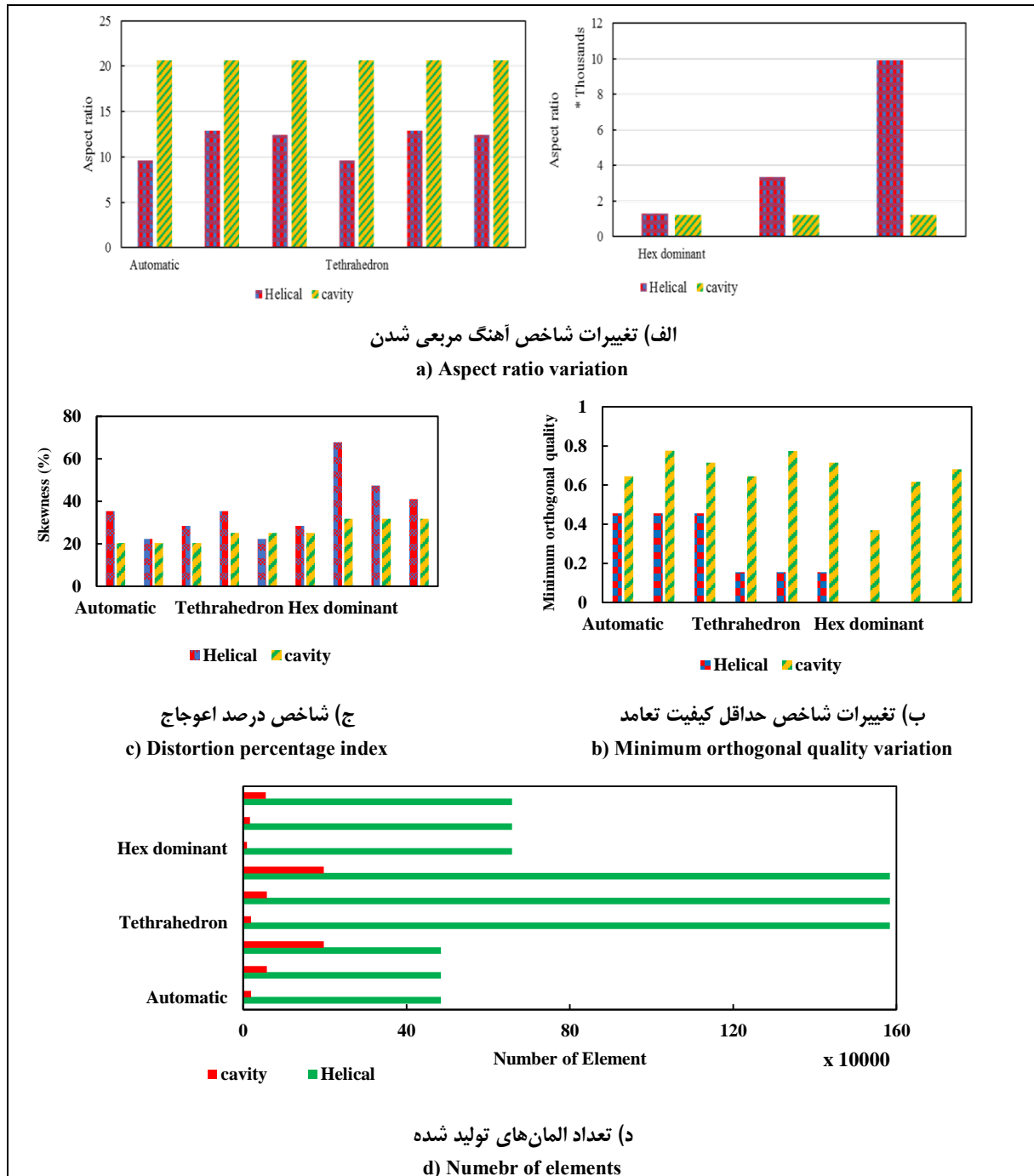
مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی

بر اساس نتایج خروجی حل عددی و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقایسه‌ای شد بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی. دو پارامتر دمای سیال خروجی و تغییرات چگالی برای اعتبارسنجی حل مقایسه شدند. شرایط حل عددی به گونه‌ای پیش رفت که حل در ۱۸۰۰ تکرار متوقف شد و تمامی معادلات همگرا شدند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در ۱۸۰۰ تکرار حل شده، نتایج خروجی حل عددی برای زمان ۹۰۰ ثانیه کاری سامانه قابل تعمیم است. با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته روی پارامتر دمای خروجی سیال عامل، روند تغییرات دمای سیال در جاذب مارپیچی دارای آهنگ رشد نسبتاً خطی است، اما در جاذب استوانه‌ای پس از گذشت ۵۰۰ تکرار، جهش دمایی رخ داده که دلیل آن توزیع نایکسان حرارت روی هندسه است. با توجه به آهنگ رشد دمای سیال خروجی روی دو نوع جاذب، میزان خطای نسبی نیز متفاوت برآورد شد. در ۵۰۰ تکرار اول میزان خطای نسبی جاذب استوانه‌ای حدود ۱۱ درصد و میزان خطای نسبی جاذب مارپیچی حدود ۶ درصد به دست آمد. با پیشروی روند حل میزان خطای نسبی نتایج حل عددی و حل آزمایشگاهی به کمتر از ۵ درصد در هر دو هندسه رسید. در اعتبارسنجی تغییرات چگالی، روند تغییرات به صورتی بود که خطای نسبی کمتر از ۱ درصد به دست آمد. البته به

مقایسه بین اعتبارسنجی شبکه دو هندسه می‌تواند نتایج قابل توجهی به دست دهد. از جمله این نتایج، توجیه برابری مقادیر شبکه‌بندی در هندسه مارپیچی است. نتایج اعتبارسنجی شبکه نشان دادند که هر مقدار شکل جاذب به سمت منظم شدن میل کند، تأثیر شکل المان‌بندی بر هندسه میدان حل کمتر می‌شود. به معنای دیگر، با استفاده از هندسه‌های مارپیچی می‌توان به راحتی شبکه‌بندی را با دقت بالا عملی کرد بی‌آنکه نتایج خروجی وابستگی زیادی به کیفیت شبکه داشته باشند. در هندسه مارپیچی، استفاده از المان شش‌وجهی قابل توجیه نیست زیرا میزان حداقل کیفیت تعامد به سمت سفر میل کرده و حداکثر نسبت کشیدگی در حدود ۱۰۰۰۰ به دست آمده است. با این همه، در شکل‌های مارپیچی لازم است تعداد المان‌های ایجاد شده بیشتر از المان‌های شکل

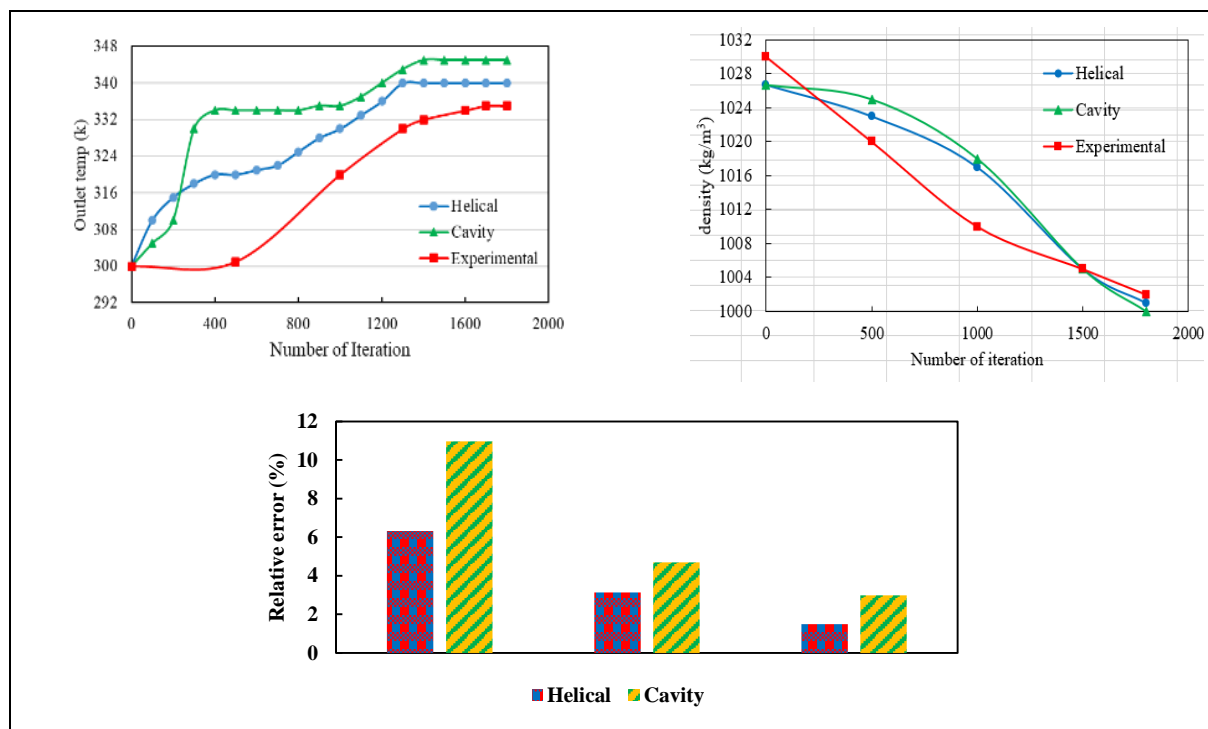
اطمینان کمتری نسبت به تغییرات چگالی در حین حل عددی می‌توان صحبت کرد. در شکل ۷ نتایج اعتبارسنجی حل عددی و تغییرات خطای نسبی نشان داده شده است.

این نکته نیز باید اشاره کرد که تغییرات چگالی و نوع روش حل آن چندان بر اساس تغییرات نسبت حجمی سیال خروجی نبوده و تغییرات چگالی سیال خروجی وابسته به تغییرات دما نیست و بنابراین با



شکل ۶- تعداد المان و معیارهای کیفیت‌سنجی شبکه در دو هندسه حفره‌ای استوانه‌ای و مارپیچی

Fig. 6- Numebr of element and quality criteria of grid generation in cavity and helical whole domain

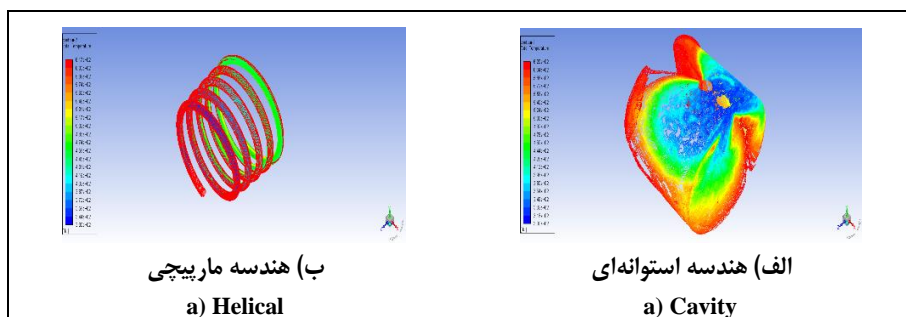


شکل ۷- نتایج اعتبارسنجی نتایج حل عددی و آزمایشگاهی

Fig. 7- Validation results

سطح دو هندسه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان انتقال حرارت در جاذب استوانه‌ای در انتهای استوانه بیشتر است تا در سطح بالایی آن. بنابراین، فرآیند تبخیر و نمک‌زدایی در ابتدا از سطح پایینی جاذب استوانه‌ای شروع می‌شود و اگر مبدل حرارتی قرار است در جاذب استوانه‌ای قرار گیرد، لازم است سطح بیشتری از مجرای مبدل در تماس با سطح پایینی جاذب استوانه‌ای قرار گیرد.

به کمک نتایج حل عددی می‌توان توزیع حرارت را بر دامنه حل نیز به دست آورد. نتایج حل عددی نشان دادند که توزیع حرارت در دو هندسه متفاوت است. به دلیل تقارن هندسی در هندسه مارپیچی، توزیع حرارت پس از اتمام حل به طور یکنواخت روی تمامی سطوح بیرونی پخش شده است. بنابراین، در هندسه مارپیچی نسبت توزیع حرارت یکسان است. شکل ۸، توزیع حرارت را بر



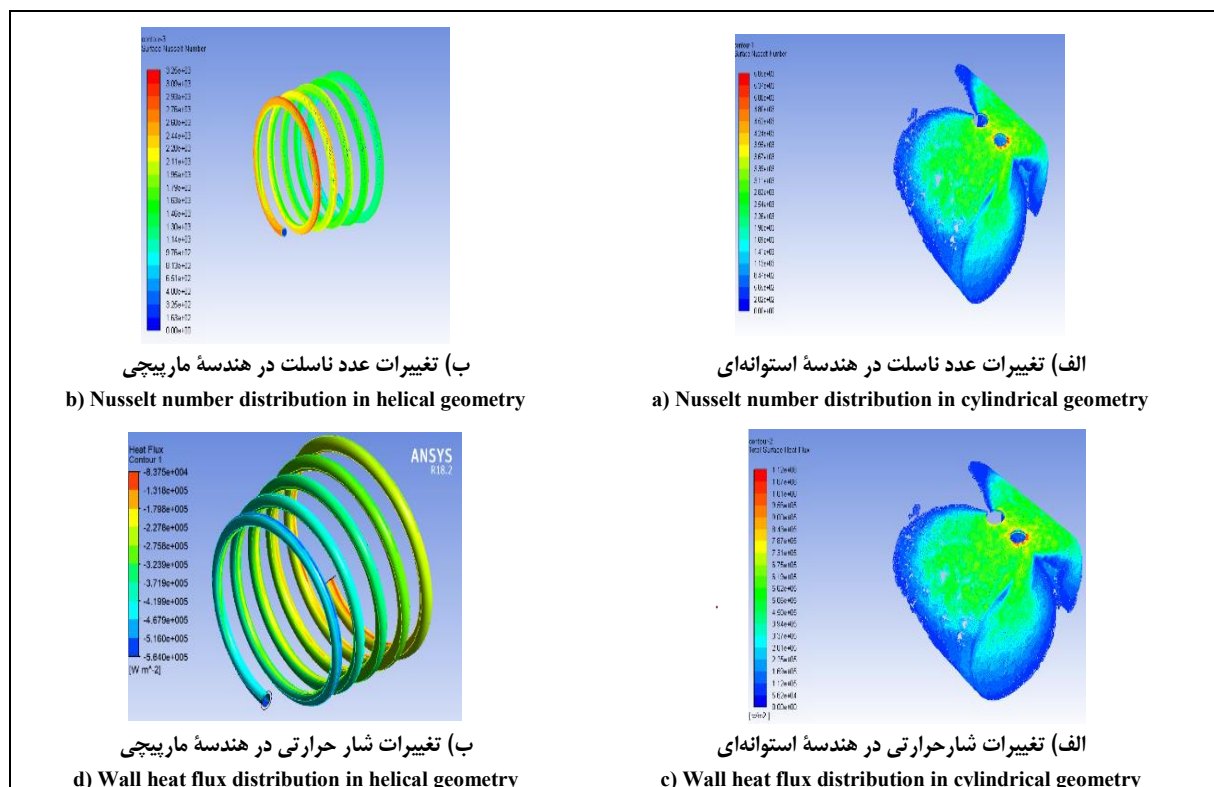
شکل ۸- کانتور توزیع حرارت در سطح جاذبها

Fig. 8- Wall heat flux Contour

تحلیل حرارتی جاذب‌ها بر اساس شار حرارتی و مقدار عدد ناسلت

همانند تحلیل توزیع حرارتی بر سطح جاذب‌ها می‌توان دو پارامتر شار حرارتی و عدد ناسلت را روی دو هندسه بررسی کرد. کانتور شار حرارتی و عدد ناسلت در جاذب مارپیچی شکلی مشابه توزیع حرارتی در کل سامانه را نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان گفت که تغییرات عدد ناسلت و شار حرارتی در جاذب مارپیچی یکنواخت است و می‌تواند حرارت پایداری را در مدت زمان کارکرد سامانه به سیال عامل انتقال دهد. در جاذب استوانه‌ای، میزان تغییرات شار حرارتی و عدد ناسلت نشان داد که تمرکز تنش حرارتی در موقیعت مکانی خروجی سیال عامل وجود دارد. بدین معنی که نوعی تمرکز انتقال حرارت جابه‌جایی- رسانش در خروجی سیال عامل به وجود آمده است. توزیع

انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایتی در هر دو جاذب تفاوت‌هایی نسبت به همدیگر دارد. به دلیل وجود حفره در هندسه استوانه‌ای، تمرکز تنش حرارتی در انتقال حرارت جابه‌جایی به وجود می‌آید که بر توزیع حرارت روی کل هندسه اثرگذار است. اما در هندسه مارپیچی توزیع انتقال حرارت به دلیل یکپارچگی سطح تقریباً یکنواخت است. نتایج به دست آمده با تغییرات عدد ناسلت نیز همخوانی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقطع نمک‌زدایی به تنهایی در انتهای استوانه نیست و افزایش شار در مقطع خروجی جریان سیال یک جهش دمایی در سیال خروجی را ایجاد می‌کند که این حالت امکان تغییرات چگالی سیال را در لوله برگشت به‌وجود می‌آورد. شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت و شار حرارتی را روی سطح دو هندسه نشان می‌دهد.



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت و شار حرارتی در دو هندسه

Fig. 9- Nusselt number and heat flux distribution in both geometries

مقایسه عملکرد سامانه حاضر با سایر مطالعات

بررسی عملکرد سامانه با سایر مطالعات مشابه نشان داد که استفاده از جاذب مارپیچی در افزایش بازده حرارتی اثرگذار است، به گونه‌ای که در اندازه مشابه، بازده این سامانه نسبت به دیگر سامانه‌ها بالاتر است. اثر سیال عامل در تغییرات بازده حرارتی سامانه اثرگذار

است. با توجه به اندازه سامانه و طراحی پایلوت آن برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تأمین حرارت مبدل‌های حرارتی و تولید انرژی برق، توان تولیدی کمتری نسبت به دیگر نمونه‌های مشابه دارد. جدول ۶، بررسی عملکرد سامانه حاضر را با دیگر نمونه‌های مشابه نشان می‌دهد.

جدول ۵- بررسی عملکرد سامانه حاضر با دیگر مطالعات

Table 6. Comparison of the performance of the system in this study with similar research

پژوهش‌ها Research	توان تولیدی (Kw _e) Power generation	نوع سامانه خورشیدی Type of solar system	نوع جاذب حرارتی Type of receiver	HTF	نوع ذخیره انرژی حرارتی Type of TES	نوع سیکل توانی Type of power cycle	سیال در سیکل توانی Type of working fluid	راندمان حرارتی (درصد) Thermal efficiency	مجموع راندمان حرارتی و الکتریکی (درصد) Electrical and thermal efficiency summation
پژوهش حاضر Recent reseach	118.1	PDC	مخروطی	روغن حرارتی	دو تانک حرارتی	ORC ساده	تولون	42	64
(Khan et al., 2019)	-	PDC	نیمه کروی	دو نانو سیال - مقایسه‌ای	-	برایتون	CO ₂	43.73	-
(Ramos et al., 2018)	-	ETC, FPC	-	روغن حرارتی	ترموکلین	ORC ساده	R245fa, R1233zd	27.14	-
(Bellos and Tzivanidis, 2017)	167	PTC	-	سه نانو سیال - مقایسه‌ای	ترموکلین	با ORC باز یاب	مقایسه‌ای چند مورد	20.11	-
(Yang et al., 2019)	1000	PTC	-	روغن حرارتی	دو تانک حرارتی	ORC ساده و با باز یاب	مقایسه‌ای چند مورد	-	17.9
(Ashouri et al., 2015)	100	PTC	-	روغن حرارتی	-	با ORC باز یاب	مقایسه‌ای چند مورد	-	26.75

نتیجه‌گیری

همرفتی در بازدهی فرآیند تصفیه آب دریا ارائه شود. برای رسیدن به این هدف، دو هندسه جاذب مد نظر قرار گرفتند. با توجه به نتایج پژوهش‌های مرتبط و هندسه‌های پیشنهادی، نتیجه گرفته شد که نحوه توزیع حرارتی سطح جاذب در میزان فرآیند تصفیه آب دریا اثرگذار است. بنابراین، با رعایت الزام‌های حل عددی مبتنی بر روش حجم کنترل، گسسته-سازی حل و شرایط اولیه و مرزی تعیین شدند. سپس، دو هندسه مد نظر از لحاظ پارامترهای

یکی از راه‌حلهایی که برای رفع چالش کارکرد بهینه و افزایش بازده سامانه نمک‌زدایی خورشیدی بر پایه تبخیر و تقطیر پیشنهاد شده است تحلیل حرارتی سامانه با تمرکز بر تحلیل حرارتی جاذب است. پس از بیان اهمیت جذب و توزیع حرارت در جاذب سعی شد تا به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی دقیقی از رفتار جریان سیال به منظور بررسی تأثیر انتقال حرارت جابه‌جایی و

در کف جاذب بیشتر از سطح بالایی آن است. بنابراین پیشنهاد شد که در صورت استفاده از سامانه مبدل حرارتی در داخل جاذب استوانه‌ای، خط جریان و ماند جریان سیال به صورتی تنظیم گردد که در کف جاذب استوانه‌ای زمان بیشتری صرف شود. تحلیل عدد ناسلت نیز نشان داد که تمرکز تنش حرارتی در خروجی سیال ممکن است باعث انتقال فرآیند تصفیه از داخل جاذب به مجرای خروجی انتقال سیال بشود. تحلیل حرارتی جاذب استوانه‌ای نیز نشان داد که در صورت نیاز به توزیع حرارت یکنواخت، استفاده از این هندسه می‌تواند در اولویت قرار گیرد. نتایج به دست آمده با پژوهش‌های دیگر محققان مقایسه شد و نتایج نشان داد که اندازه سامانه، شکل جاذب و سیال عامل از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر بازده حرارتی و توان تولیدی سامانه نمک‌زدای خورشیدی است. استفاده از هندسه مارپیچی به دلیل توزیع حرارت یکنواخت در کل سطح جاذب موجب افزایش توانمندی نمک‌زدایی سامانه شد. سیال عاملی که دارای ظرفیت گرمایی بالاتری باشد موجب افزایش بازده حرارتی سامانه می‌شود. اما مکان هندسی فرآیند تبخیر به بعد از دامنه میدان اثرگذاری جاذب انتقال پیدا می‌کند.

کیفیت شبکه‌بندی بررسی شدند. نتایج تئوری استقلال از شبکه نشان دادند که در هندسه جاذب استوانه‌ای استفاده از روش شبکه‌بندی چهاروجهی با مرتبه مربعی می‌تواند کیفیت مناسب شبکه را با ایجاد ۵۸۰۱۲ المان ایجاد کند. با وجود این، ویژگی تقارن هندسی شبکه جاذب مارپیچی باعث شد به کارگیری ساده‌ترین روش شبکه‌بندی (۴۸۴۵۰۸ عدد المان به روش شبکه‌بندی خودکار) کیفیت مناسبی ارائه دهد و نیازی به تغییر روش شبکه‌بندی یا ریز کردن شبکه نباشد. برای اعتبارسنجی حل عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، سعی شد تا گذرا بودن حل عددی در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی لحاظ گردد. بنابراین، مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی در گام‌های زمانی مختلف به اجرا درآمد. دو پارامتر خروجی تغییرات حرارت جریان سیال و تغییرات چگالی سیال عامل در نظر گرفته شد. حداکثر خطای نسبی محاسبه شده برای دمای خروجی جریان سیال در حدود ۱۱ درصد بود و حدود تغییرات خطای نسبی در تغییرات چگالی جریان سیال به ۱ درصد نرسید. بنابراین، نتایج حل عددی برای تحلیل حرارتی در سامانه نمک‌زدا قابل تعمیم است. نتایج توزیع حرارتی در جاذب استوانه‌ای نشان دادند که تمرکز تنش حرارتی

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Ashouri, M., Razi Astarai, F., Ghasempour, R., Ahmadi, M. H., & Feidt, M. (2015). Thermodynamic and economic evaluation of a small-scale organic Rankine cycle integrated with a concentrating solar collector. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12, 54-65. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctv025>.

- Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2017). Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, *114*, 1376-1393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.055>.
- Gorjian, Sh. (2013). Construction and evaluation of solar parabolic desalination device with point focus (Ph. D. Thesis), Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Gorjian, S., & Ghobadian, B. (2015). Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, *48(C)*, 571-584.
- Guderzi, M., Hoseinzadeh, M. (2014). *Solar desalination, Opportunity for the world today. The First National Conference on New Technologies in Chemistry and Petrochemicals*, April 14, Tehran, Iran. (in Persian)
- Hipólito-Valencia, B. J., Mosqueda-Jiménez, F. W., Barajas-Fernández, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Incorporating a seawater desalination scheme in the optimal water use in agricultural activities. *Agricultural Water Management*, *244*, 106552. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106552>.
- Khan, M. S., Abid, M., Ali, H. M., Amber, K. P., Bashir, M. A., & Javed, S. (2019). Comparative performance assessment of solar dish assisted s-CO₂ Brayton cycle using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, *148*, 295-306.
- Mahmood, F., & Al-Ansari, T. A. (2021). Design and thermodynamic analysis of a solar powered greenhouse for arid climates. *Desalination*, *497*, 114769. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114769>.
- Mismi, H., Noorbakhsh, S., Haghi, H., & Zarnagarian, A. (2008). Investigating the use of solar-assisted hemp water desalination. The First Conference on Coping with Water Scarcity, Jan. 22, Tehran, Iran. (in Persian)
- Muñoz, M., Gil, J. D., Roca, L., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2020). An IoT architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in Almería (Spain). *Sensors*, *20(3)*, 596. <https://doi.org/10.3390/s20030596>.
- Ramos, A., Chatzopoulou, M. A., Freeman, J., & Markides, C. N. (2018). Optimisation of a high-efficiency solar-driven organic Rankine cycle for applications in the built environment. *Applied Energy*, *228*, 755-765. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.059>.
- Roca, L., Sánchez, J. A., Rodríguez, F., Bonilla, J., De la Calle, A., & Berenguel, M. (2016). Predictive control applied to a solar desalination plant connected to a greenhouse with daily variation of irrigation water demand. *Energies*, *9(3)*, 194. <https://doi.org/10.3390/en9030194>.
- Stuber, M. D., Sullivan, C., Kirk, S. A., Farrand, J. A., Schillaci, P. V., Fojtasek, B. D., & Mandell, A. H. (2015). Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources. *Desalination*, *355*, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.037>.
- Weiner, A. M., Blum, D., Lienhard, V., & Ghoniem, A. (2015). *Design of a hybrid RO-MED solar desalination system for treating agricultural drainage water in California. The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse*. Aug. 30- Sep. 4. San Diego, United States.
- Yang, J., Li, J., Yang, Z., & Duan, Y. (2019). Thermodynamic analysis and optimization of a solar organic Rankine cycle operating with stable output. *Energy Conversion and Management*, *187*, 459-471. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.021>.

Research Paper

Thermal Analysis of Solar Parabolic Desalination System with Point Focus by Computational Fluid Dynamics Method

J. Ashrafi Varkani, Sh. Gorjian* and B. Ghobadian

*Corresponding Author: Associate Professor, Mechanics of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran. Email: gorjian@modares.ac.ir

Received: 24 October 2023, Accepted: 20 April 2024

<http://10.22092/amsr.2024.363901.1465>

Abstract

Concentrators have many functions, one of which is their use in the evaporation of liquids. Since a high level of heat is present in concentrator absorbers, it is possible to develop a heat exchanger system that enables the vaporization of salt water. One of the main components of these systems is the heat absorber, which is located at the focal point. In this study, an attempt was made to investigate two geometries of annular and hollow absorbers using the computational fluid dynamics (CFD) method. For this purpose, the working fluid was defined based on the properties of seawater in the Fluent Ansys software, and the creation of the geometry and thermal analysis was considered based on the initial and boundary conditions of the system. The results of the validation of the grid quality showed that the use of a tetrahedral grid with square grid order is suitable for the cylindrical geometry. Due to the dimensional symmetry of the geometry of the ring converter, the use of the simplest grid method leads to a high accuracy of the solver. The thermal analysis of the absorber has shown that with the cavity geometry, the heat distribution at the bottom of the geometry is greater than at the top. The results of the Nusselt number change analysis showed the concentration of thermal stress in the area of the liquid outlet. This stress concentration leads to a shift of the evaporation process from the inside of the chamber to the transfer tubes.

Keywords: Absorber, Distillation System, Numerical Analysis, Solar Concentrator



© 2023 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)