



شبیه سازی و تحلیل حساسیت کلکتور خورشیدی تخت با بکارگیری صفحه جاذب آلومینیوم

محمدباقر حمیدی^{۱*}، مجتبی وفائی نژاد^۲، بهزاد عزیزی مهر^۳، عبدالرزاق کعبی نژادیان^۴

۱- کارشناسی ارشد، سیستم های انرژی، گروه مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

۴- استادیار، سازمان انرژی های نو، وزارت نیرو، تهران، ایران

* یاسوج، ۷۵۹۱۱۷۶۱۱۵، hamidi.mb96@gmail.com

چکیده

امروزه با افزایش روزافزون مصرف انرژی، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. در این میان انرژی خورشید به لحاظ عدم تولید آلاینده ها جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. یکی از ساده ترین و مؤثرترین وسیله ها برای جمع آوری انرژی خورشید، کلکتور خورشیدی صفحه تخت است. در این پروژه، یک مدل نوین کلکتور خورشیدی توسط نرم افزار فلویونت شبیه سازی شده و تاثیر پارامترهای مهم در طراحی کلکتور همچون ضخامت صفحه جذب، قطر لوله ها و تعداد لوله ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که افزایش قطر لوله ها، افزایش تعداد لوله ها که به منزله کاهش فاصله آن هاست، و افزایش ضخامت صفحه جاذب همگی باعث بهبود کارایی سیستم کلکتور خورشیدی صفحه تخت می گردد. برای مقایسه عملکرد این نوع هندسه با کلکتورهای مورد استفاده در صنعت، یک نوع هندسه دیگر برای کلکتور خورشیدی که در آن نصف لوله ها در بالای صفحه جاذب قرار دارند نیز در نرم افزار فلویونت شبیه سازی شد. نتایج مقایسه این دو نوع هندسه نشان می دهد که هندسه نوع اول در بهترین حالت شبیه سازی دارای راندمان انرژی ۵۹.۶۳ درصدی بوده و هندسه نوع دوم که در آن نصف لوله ها در بالای صفحه جاذب قرار دارند دارای راندمان ۶۷.۷۹ درصدی می باشد.

کلیدواژه ها: انرژی خورشیدی، کلکتور خورشیدی، صفحه جاذب، انرژی های تجدیدپذیر

Simulation and sensitivity analysis of flat plate solar collector incorporating aluminum absorber

Mohammad Bagher Hamidi^{1*}, Mojtaba Vafaenezhad², Behzad Azizimehr³, Abdolrazagh Kaabi Nejadian⁴

1. MSc., Energy Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2. Ph.D. Student, Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University Semnan Branch, Semnan Province, Iran

3. Ph.D. Student, Mechanical Engineering Department, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran Province, Iran

4. Assistant Professor, New Energy Organization, Ministry of Power, Tehran, Iran

* P.O.B. 7591176115 Yasouj, Iran, hamidi.mb96@gmail.com

Received: 05 May 2022 Accepted: 25 February 2023

Abstract

Nowadays, with the increasing consumption of energy, the use of renewable energy has become particularly important. Among the renewable energy resources, solar energy has significant potential due to its advantages like a lower price, stability, etc. One of the simplest and most effective means of collecting solar energy is the flat panel solar collector. In this project, a new model of the solar collector was simulated using Fluent software. The effect of important parameters in the design of the collector such as absorption plate thickness, tube diameter, and the number of tubes are evaluated. The simulation results show that increasing the diameter of the tubes, increasing the number of tubes which means reducing their distance, and increasing the thickness of the absorber plate all improve the efficiency of the flat plate solar collector system. To compare the performance of this type of geometry with the conventional collectors, another type of geometry for the solar collector in which half of the tubes are at the top of the absorber plate is simulated in Fluent software. The results of comparing these two types of geometry show that the geometry of the first type has an



energy efficiency of 59.63% in the best simulation model and the geometry of the second type in which half of the tubes are above the absorber plate has an efficiency of 67.79%.

Keywords: solar energy, solar collector, absorber plate, renewable energy

۱- مقدمه

با هموار نمودن موانع سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر، فرصت‌های قابل‌توجهی در اقتصاد جهانی به‌وجود خواهد آمد. انرژی‌های تجدیدپذیر با نقش بسیار مهمی که در تأمین تقاضای انرژی جهانی بازی می‌کنند، باعث مقرون‌به‌صرفه‌تر شدن این فناوری‌ها نیز می‌شوند. انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، می‌توانند پاسخ مناسبی به نگرانی‌های موجود در زمینه تغییرات آب و هوای جهانی باشند.

ایده استفاده از کلکتورهای خورشیدی و به تسخیر درآوردن توان خورشید، به دوران پیش از تاریخ بازمی‌گردد؛ یعنی زمانی که در سال ۲۱۲ قبل از میلاد، دانشمند یونانی، ارشمیدوس، روشی برای به آتش کشیدن کشتی‌های رومی‌ها ابداع کرد [۱]. باید به این نکته اشاره نمود که اولین کاربرد انرژی خورشیدی به استفاده از آن در کلکتورهای متمرکزکننده برمی‌گردد. در طول قرن هجدهم میلادی، صنعت‌گران با استفاده از کوره‌های خورشیدی که قابلیت ذوب آهن، مس و دیگر فلزات را داشتند، به ساخت آهن روکش‌شده، لنز شیشه‌ای و آینه روی آوردند. از این کوره‌ها در سراسر اروپا و خاورمیانه استفاده می‌شد. یکی از این کوره توسط دانشمندی فرانسوی بنام لاوزیر طراحی شد که قابلیت رسیدن به دمای ۱۷۵۰ درجه سانتی‌گراد را داشت. این کوره از یک عدسی اولیه به قطر ۱/۳۲ متر و یک عدسی ثانویه به قطر ۲۰ سانتی‌متر استفاده می‌کرد تا به حداکثر دمایی دست یابد که تا صد سال پس از آن برای بشر دست‌نیافتنی بود. در طی قرن ۱۹ میلادی تلاش‌هایی صورت گرفت تا انرژی خورشیدی را به دیگر اشکال از جمله بخار فشار پایین برای استفاده در موتورهای بخار تبدیل کنند. آگوست مونچوت از جمله پیشگامان در تولید و استفاده از بخار تولیدی توسط توان خورشیدی بین سال‌های ۱۸۶۴ تا ۱۸۷۸ بود. در سال ۱۸۷۵، موجوت نوآوری قابل‌توجهی در ساخت کلکتورهای خورشیدی انجام داد. نوآوری او در ساخت فرم مخلوط ناقص بازتابنده بود. کلکتورهای موجوت شامل صفحه فلزی نقره‌ای بودند که قطری برابر با ۵/۴ متر داشتند و سطح جمع‌آوری‌کننده آن‌ها ۱۸/۶ متر مربع بود. همچنین وزن قسمت متحرک برابر با ۱۴۰۰ کیلوگرم بود [۲].

در طی ۵۰ سال اخیر طراحی‌ها و ساختارهای مختلفی با استفاده از کلکتورهای متمرکزکننده برای انتقال حرارت به سیال کاری که توان مورد نیاز برای به حرکت درآوردن وسایل مکانیکی را فراهم می‌کنند، صورت گرفته است. دو فناوری متداول خورشیدی ابتدایی شامل دریافت‌کننده‌های پخشی و مرکزی می‌باشند. سیستم‌های دریافت‌کننده‌های مرکزی از چرخ آینه‌ای (آینه‌های دو محوره تعقیب‌کننده) استفاده می‌نمایند تا انرژی تابشی خورشید را بر روی یک دریافت‌کننده نصب‌شده روی برج متمرکز کنند. تکنولوژی دریافت‌کننده‌های پخشی شامل کاسه‌های مخصوص، ظرف‌های سهموی، بشقاب‌های سهموی و عدسی‌های فرنسل هستند. بشقاب‌های سهموی، خورشید را در دو محور با استفاده از آینه‌هایشان تعقیب می‌کنند تا انرژی تشعشعی را بر دریافت‌کننده نقطه‌ای متمرکز کنند.

کمبود آب همیشه یکی از مشکلات بشر بوده است. بنابراین در میان کوشش‌های اولیه برای به تسخیر درآوردن انرژی خورشیدی، تلاش‌هایی در راستای توسعه تجهیزات مناسب برای شیرین‌سازی آب دریا انجام شده است. شیرین‌سازی آب توسط خورشید در عمل برای مدت‌های طولانی انجام شده است. مالیک و همکاران [۳] اولین کار مکتوب در این زمینه را در قرن ۱۵ انجام داده‌اند که توسط موجوت در سال ۱۸۶۹ گزارش شد. موجوت گزارش کرد که کیمیاگر عرب از آینه‌های صیقل‌داده‌شده برای شیرین‌سازی خورشیدی استفاده نموده است. شیمیدان بزرگ فرانسوی، لاوازیه (۱۸۶۲) از عدسی‌های شیشه‌ای بزرگ که به‌طور استادان‌های بر روی پایه‌ها قرار گرفته بودند، برای متمرکز کردن انرژی خورشیدی بر روی فلاسک شیرین‌سازی استفاده نمود [۳]. همچنین استفاده از منعکس‌کننده‌های شیشه‌ای پوشیده شده با آلومینیوم و نقره برای متمرکز کردن انرژی خورشیدی برای شیرین‌سازی توسط موجوت توصیف شده است. استفاده از متمرکزکننده‌ها در شیرین‌سازی خورشیدی توسط پاستیور (۱۹۲۸) گزارش شده است [۳]. هلستروم و همکاران [۴] تاثیر خواص فیزیکی و گرمایی را بر عملکرد کلکتورهای صفحه‌ای تخت بررسی نمودند. آن‌ها در کار خود به این نتیجه رسیدند که افزایش فیلم تغلون به‌عنوان پوشش ثانویه منجر به افزایش عملکرد کلی تا ۵/۶٪ در ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. درحالی‌که افزایش لانه زنبوری از جنس تغلون برای کاهش اتلافات جابجایی، عملکرد کلی را تا ۱۲/۱٪ افزایش می‌دهد. همچنین عملیات برای کاهش انعکاس از روی پوشش شیشه‌ای خروجی را تا ۶/۵٪ در ۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. کومار و ردی [۵] افزایش انتقال حرارت دریافت‌کننده خورشیدی با تعبیه ماده متخلخل بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که انتقال حرارت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (۶۴/۳٪). لامبرت و همکاران [۶] دریافتند که جریان نوسانی، به‌وسیله پخش حرارتی سیال کاری در کلکتورهای خورشیدی می‌تواند انتقال حرارت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. هو و همکاران [۷] ساختاری دو مسیره برای دریافت‌کننده خورشیدی به‌کار بردند و در نتیجه استفاده از این هندسه، نرخ انتقال حرارت بهتری بدست آوردند. آکرمن و همکاران [۸] در یک مطالعه عددی، به بررسی تاثیر پره‌های داخلی بر پتل‌های کلکتورهای خورشیدی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عملکرد انتقال حرارتی بوسیله پره‌ها افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند که کاهش گام پره‌ها و همچنین افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد سازنده آن‌ها منجر به افزایش بیش‌تر انتقال حرارت می‌شود. در مطالعه‌ای که توسط سوپیان و همکاران [۹] انجام شد، نشان داده شد که تعبیه مواد متخلخل در کانال دوم با افزایش دمای خروجی منجر به افزایش بازده حرارتی سیستم می‌شود. مارتینوپولوس و همکاران [۱۰] از لانه زنبوری‌های پلی‌کربنات برای افزایش انتقال حرارت در کلکتور خورشیدی استفاده نمودند.

تحلیل‌های حرارتی و مدل‌سازی‌های عددی برای درک بهتر کلکتورهای خورشیدی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به ساها و ماهانتا [۱۱] اشاره نمود. آن‌ها به بررسی بهینه‌سازی ترمودینامیکی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت پرداختند. آن‌ها در مدل خود بر روی کاهش تمامی عوامل موثر بر تولید انرژی متمرکز نمودند. این مطالعه نشان داد رژیم عملی بهینه وجود

می‌شود. رابطه شار حرارتی در این حالت به صورت زیر است

$$q = h_f(T_w - T_f) + q_{rad} \quad (1)$$

که در معادله (۱)، h_f ضریب انتقال حرارت سمتی است که در آن سیال جریان دارد، T_w دمای دیواره، T_f دمای محلی سیال در نزدیکی دیواره و q_{rad} شار حرارتی انتقال‌یافته از سطوح دیگر یا اشعه خورشید است.

همچنین باید اشاره کرد که میزان انتقال حرارت جابه‌جایی ناشی از سیال به دیواره وابسته به پارامترهایی همچون شدت آشفتگی جریان، دمای محلی و پروفیل سرعت روی سطح خواهد بود. پس از محاسبه میزان حرارت انتقال‌یافته به سطح از طریق سیال، شار حرارتی درون جامد نیز از طریق رابطه (۲) و بر اساس قانون نیوتون محاسبه می‌گردد

$$q = \frac{K_s}{\Delta n}(T_w - T_s) + q_{rad} \quad (2)$$

که در این رابطه، K_s میزان ضریب انتقال حرارت جامد، T_w دمای سلول‌های نزدیک مرز جامد و سیال، T_s دمای جامد و Δn نیز فاصله میان سطح دیواره تا مرکز سلول‌ها در سیال است.

شرط شار حرارتی ثابت: در صورتی که اطلاعات شار انتقال حرارت از دیواره به سیال موجود باشد، از این شرط روی دیواره استفاده می‌شود. با تعیین شار انتقال حرارت دیواره، دمای دیواره از رابطه (۳) یافت می‌شود.

$$T_w = \frac{q - q_{rad}}{h_f} + T_f \quad (3)$$

همچنین انتقال حرارت همرفتی در جامد به صورت زیر محاسبه خواهد شد

$$T_w = \frac{(q - q_{rad})\Delta n}{h_s} + T_s \quad (4)$$

شرط مرزی دیواره با انتقال حرارت جابه‌جایی: از این شرط زمانی استفاده می‌گردد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و دمای سیال عبوری در کنار دیواره مشخص باشد. با معلوم بودن این دو پارامتر و از رابطه‌ی زیر می‌توان شار حرارتی منتقل شده به سطح را محاسبه کرد.

$$q = h_f(T_w - T_f) + q_{rad} = h_{ext}(T_{ext} - T_w) \quad (5)$$

در این رابطه h_{ext} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و T_{ext} دمای سیال در کناره سطح است. در صورتی که انتقال حرارت تشعشعی نیز در نظر گرفته شود، از رابطه اول استفاده خواهد شد.

شرط مرزی دیواره با انتقال حرارت تشعشعی خارجی: این شرط زمانی کاربرد دارد که در مسئله مورد نظر یک چشمه یا چاه حرارتی تشعشعی دورتر از سطحی که شرایط مرزی روی آن تعیین می‌شود وجود داشته باشد. ورودی‌هایی که نرم‌افزار برای محاسبه شار حرارتی منتقل شده از/ به سطح نیاز دارد، ضریب انتشار و دمای سطح تشعشعی در دوردست است.

$$q = h_f(T_w - T_f) + q_{rad} = \varepsilon_{ext}\sigma(T_{\infty}^4 - T_w^4) \quad (6)$$

در این رابطه ε_{ext} ضریب انتشار سطح دوردست، T_{∞} دمای سطح دوردست و σ ثابت استفان-بولتزمن هستند.

بر روی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بازده اکسرژی با افزایش بازده نوری و شار حرارتی نور خورشید بر خوردی افزایش و با افزایش دمای محیط و سرعت باد به شدت کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند که دمای ورودی بهینه‌ای برای سیال وجود دارد و قطر لوله تاثیر کمی بر بازده اکسرژی دارد. سلمی و همکاران [۱۳] به شبیه‌سازی پدیده انتقال حرارت در یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت با استفاده از نرم‌افزار و تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آن‌ها در کار خود انتقال حرارت ترکیبی هدایت، جابجایی و تشعشع را بین سطح لوله، شیشه پوشش، دیواره‌های کناری و عایق پایه کلکتور فرض کردند. نتایج بدست آمده از کار آن‌ها با نتایج داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان داد. گارگ و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای که به صورت تئوری انجام شد، به بررسی مشکل بهینه‌سازی پارامترهای پره و کلکتور صفحه تخت پرداختند. آن‌ها در کار خود ساختار بهینه کلکتور را برای ۶ هندسه مختلف ارائه دادند. لاند و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای که به صورت تحلیلی صورت گرفت، جریان موازی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت را بررسی نمودند. نهایتاً معادله‌ای کلی برای طراحی و همچنین یک نمودار برای تعیین فاکتور بازده کلکتور ارائه دادند. قمری و ورث [۱۶] روشی ساده برای تعیین فاصله بهینه لوله‌ها در یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت ارائه دادند. تیریس و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای تحلیلی به بررسی تاثیر طراحی‌های مختلف پره در کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت پرداختند. النمر و همکاران [۱۸] به‌طور تحلیلی بسطی برای طول بهینه یک کلکتور خورشیدی با فرض خواص حرارتی ثابت بدست آوردند. ساریاش و همکاران [۱۹] در مطالعه‌ای عددی، تاثیر ضریب هدایت صفحه جاذب بر روی عملکرد ترموسیفون یک آب‌گرم‌کن خورشیدی را بررسی نمودند. تورس ریز و همکاران [۲۰] در یک تحلیل تئوری که نتایج آن به خوبی نتایج حاصل از یک کار آزمایشی بود، به بهینه‌سازی عملکرد پارامترهای یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت پرداختند. ساها و ماهانتا (۲۰۰۱) از قوانین کمینه‌سازی تولید آنتروپی برای بدست آوردن مدلی تئوری برای کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی هم‌دما و غیرهم‌دما بهره گرفتند. ماهانتا و ساها [۲۱] در پژوهشی تحلیلی مسئله بازگشت‌ناپذیری‌های داخلی در آب‌گرم‌کن خورشیدی کلکتور صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. یاه و همکاران [۲۲] در کاری بصورت تئوری تاثیر نسبت هم‌ارزی بر بازده گرمایی صفحه و لوله در انواع مختلف کلکتور خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند.

۲- روش‌شناسی

روابط حاکم بر شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار فلوئنت^۱ صورت می‌گیرد، شامل شرط دما ثابت، شرط شار حرارتی ثابت، شرط مرزی دیواره با انتقال حرارت جابه‌جایی، شرط مرزی دیواره با انتقال حرارت تشعشعی خارجی و شرط مرزی دیواره ترکیبی از انتقال حرارت تشعشعی خارجی و جابه‌جایی است که در ادامه شرح داده خواهند شد.

شرط دما ثابت: زمانی که دما روی یک سطح مشخص باید، از شرط دمای دیواره ثابت استفاده می‌شود. در صورتی که دمای دیواره از طرف کاربر

1. ANSYS Fluent

۲	۳۰.۹	۱۶	اول	۳
۲	۲۰	۱۲	اول	۴
۳	۳۰.۹	۱۲	اول	۵
۴	۳۰.۹	۱۲	اول	۶
۲	۴۰	۱۲	اول	۷
۲	۳۰.۹	۱۲	دوم	۸

جدول ۲. مشخصات حرارتی مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی حاضر

نوع ماده	دانشسته (kg/m ³)	C _p (J/kg.K)	ضریب هدایت حرارتی (w/m.K)	ویسکوزیته (kg/m.s)
هوای ایده‌آل (متغیر)	۱۰۰۶.۴۳	۰.۲۴۲	۰.۱۷۳	۱۰-۵ ۱.۷۸۹۴
عایق (چوب)	۷۰۰	۲۳۱۰	۰.۱۷۳	-
مس	۸۹۷۸	۳۸۱	۳۸۷.۶	-
جاذب آلومینیومی	۲۷۱۹	۸۷۱	۲۰۲.۴	-
شیشه	۲۲۲۰	۸۳۰	۰.۷۶	-
آب	۹۹۸.۲	۴۱۸۲	۰.۶	۰.۰۱۰۰۳

۴- نتایج و بحث

در بخش نتایج، انتگرال دمای ورودی آب به لوله در مقایسه با دمای خروجی آن ارائه می‌شود. همچنین کانتورهای دما و سرعت به همراه خطوط جریان در محفظه هوا مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در ادامه، نتایج برای هشت حالت در قالب‌های مذکور ارائه و هر حالت با حالت مرجع (حالت اول) مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که دمای آب در خروجی کلکتور، به ازای دمای ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد، به مقدار ۲۱.۱۵۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. کانتور حجمی دما برای حالت اول شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. بدیهی است که سطح بالای صفحه جاذب به علت تابش خورشید گرم‌تر بوده و هر چه به پایین صفحه جاذب می‌رسیم، از دما کاسته می‌شود. در حالت دوم شبیه‌سازی دمای خروجی آب به ازای دمای ورودی ۲۰ درجه، به مقدار ۲۱.۵۸۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در حالت سوم شبیه‌سازی، دمای خروجی به ازای دمای ورودی ۲۰ درجه، به مقدار ۲۲.۲۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که از حالت‌های قبلی شبیه‌سازی بالاتر بوده و در نتیجه مطلوب‌تر است. در حالت چهارم، دمای خروجی به مقدار ۲۰.۶۶۶ می‌رسد. در حالت پنجم شبیه‌سازی، مقدار دمای آب در خروجی کلکتور ۲۱.۵۱۴ درجه سانتی‌گراد است. در حالت ششم این مقدار برابر است با ۲۲.۰۸۵ درجه سانتی‌گراد. در حالت هفتم نیز مقدار دمای آب در خروجی کلکتور برابر ۲۲.۰۱۱ درجه سانتی‌گراد بوده و در نهایت این مقدار در حالت هشتم ۲۲.۶۰۳ درجه سانتی‌گراد است که بالاترین دما در بین هشت حالت شبیه‌سازی می‌باشد. کانتور حجمی دما برای حالت‌های دوم تا هشتم به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۱۰ نشان داده شده است. برای مقایسه همه حالات شبیه‌سازی شده، مقدار دمای سیال کاری در خروجی کلکتور و میزان بازدهی انرژی کلکتور برای نقطه شبیه‌سازی برای همه حالات در جدول ۳ ارائه شده است.

بررسی راندمان انرژی هر یک از هندسه‌ها نشان می‌دهد که افزایش قطر لوله‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کارایی کلکتور خورشیدی را افزایش می‌دهد.

شرط مرزی دیواره ترکیبی از انتقال حرارت تشعشعی خارجی و جابه‌جایی: در صورتی که هر دو مکانیزم انتقال حرارت تشعشع ناشی از سطحی در دوردست و انتقال حرارت جابه‌جایی روی یک سطح از هندسه برقرار باشد، می‌توان از ترکیب این دو شرط استفاده کرد.

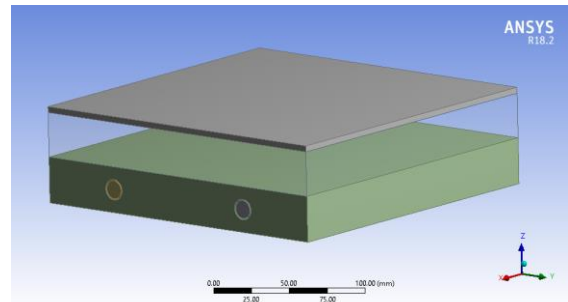
$$q = h_f(T_w - T_f) + q_{rad} \quad (7)$$

$$= h_{ext}(T_{ext} - T_w) + \epsilon_{ext}\sigma(T_{\infty}^4 - T_w^4)$$

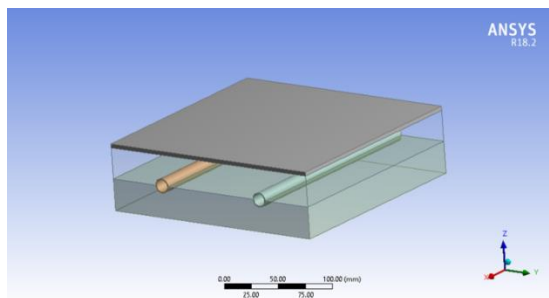
۳- ورودی‌های مسئله

در این شبیه‌سازی دو نوع هندسه کلی مورد بررسی قرار گرفته است. نوع اول هندسه و همچنین ابعاد هندسی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. هندسه دوم با تغییر محل قرارگیری لوله‌های مسی به میان جاذب آلومینیومی و هوا مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. این هندسه نیز در شکل ۲ قابل مشاهده است.

هشت حالت شبیه‌سازی که در آن‌ها قطر لوله، ضخامت جاذب آلومینیوم و تعداد لوله‌ها متغیر است، طبق جدول ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرند. شرایط مرزی شبیه‌سازی صورت گرفته به صورتی است که صفحات خارجی بلوک به طور کلی جز در نواحی ورودی و خروجی آب به عنوان دیواره تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است صفحه ۴ میلی‌متری بالای بلوک (راستای مثبت Z) از جنس شیشه، صفحه زیر آن (محل حرکت سیال هوا) در پایین سیال بلوک جاذب آلومینیومی و نیز لوله‌های مسی به ضخامت ۱ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. درون لوله‌ها سیال سرد آب جریان دارد. مشخصات حرارتی مواد مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ قابل مشاهده است.



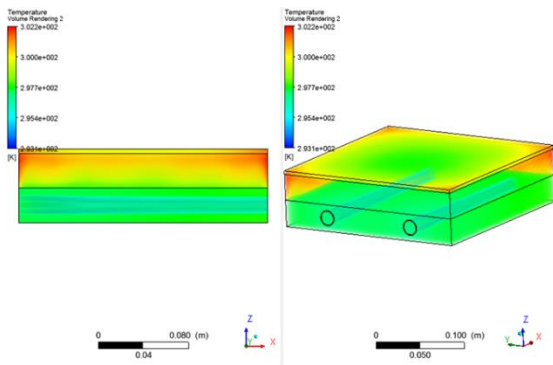
شکل ۱. هندسه نوع اول



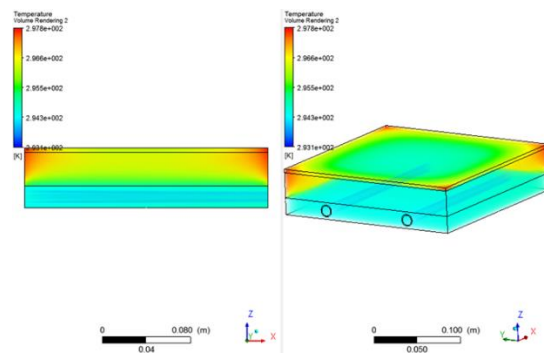
شکل ۲. هندسه نوع دوم

جدول ۱. حالت‌های مختلف شبیه‌سازی

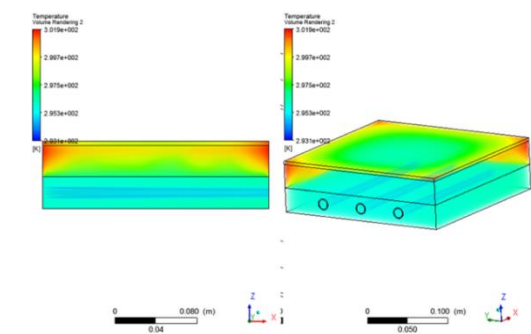
حالت شبیه‌سازی	نوع هندسه	قطر لوله (میلی‌متر)	ضخامت جاذب (میلی‌متر)	تعداد لوله‌ها
۱	اول	۱۲	۳۰.۹	۲
۲	اول	۱۴	۳۰.۹	۲



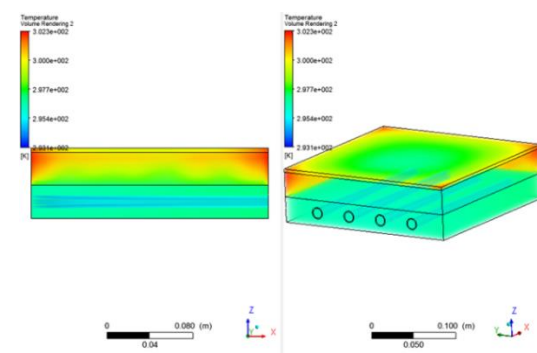
شکل ۵. کانتور حجمی دما برای حالت سوم شبیه‌سازی



شکل ۶. کانتور حجمی دما برای حالت چهارم شبیه‌سازی



شکل ۷. کانتور حجمی دما برای حالت پنجم شبیه‌سازی

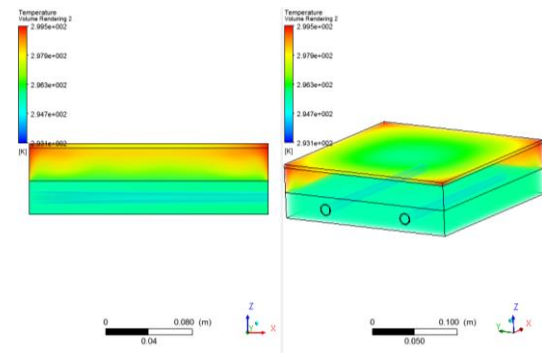


شکل ۸. کانتور حجمی دما برای حالت هشتم شبیه‌سازی

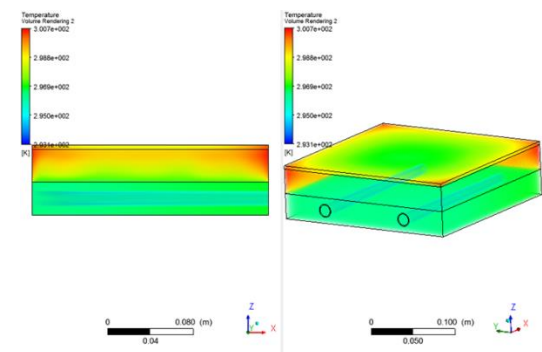
به طور مشابه، افزایش ضخامت صفحه جاذب و تعداد لوله‌ها نیز کارایی کلکتور مورد بررسی را افزایش می‌دهد. با این حال، قرار دادن نصف لوله‌ها در بالای صفحه جاذب باعث افزایش کارایی کلکتور نسبت به حالتی می‌شود که در آن همه لوله‌ها در داخل صفحه جاذب قرار دارند.

جدول ۳. دمای آب خروجی و راندمان برای حالات مختلف شبیه‌سازی

حالت	دمای آب در خروجی کلکتور (°C)	راندمان انرژی (%)
اول	۲۱.۱۵۶	۳۰.۱۰
دوم	۲۱.۵۸۳	۴۱.۲۲
سوم	۲۲.۲۹۰	۵۹.۶۳
چهارم	۲۰.۶۶۶	۱۷.۳۴
پنجم	۲۱.۵۱۴	۳۹.۳۲
ششم	۲۲.۰۸۵	۵۴.۳۰
هفتم	۲۲.۰۱۱	۵۲.۳۷
هشتم	۲۲.۶۰۳	۶۷.۷۹



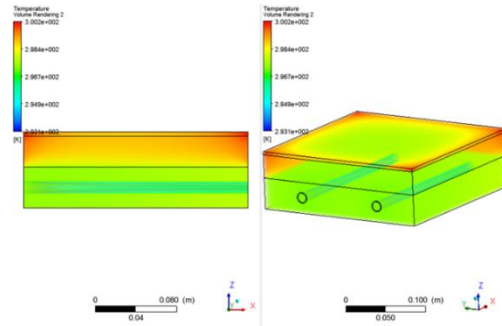
شکل ۳. کانتور حجمی دما برای حالت اول شبیه‌سازی



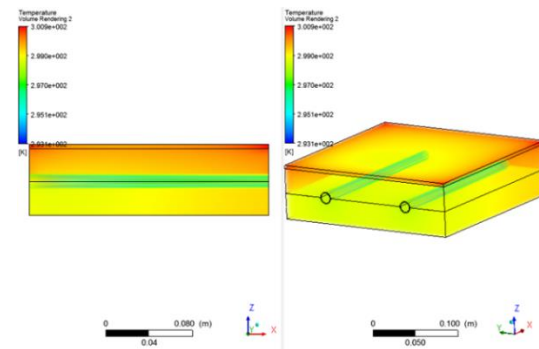
شکل ۴. کانتور حجمی دما برای حالت دوم شبیه‌سازی

۶- مراجع

- [1] B. Anderson, Solar energy: fundamentals in building design, McGraw-Hill, 1977.
- [2] B. Meinel and M. P. Meinel, Applied solar energy: an introduction, Addison-Wesley Pub. Co, 1976.
- [3] M. A. S. Malik, Solar distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction, and performance, Pergamon Press, 1982.
- [4] B. Hellstrom, M. Adsten, P. Nostell, B. Karlsson, and E. Wackelgard, The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors, *Renewable Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 331–344, 2003.
- [5] K. Ravi Kumar and K. S. Reddy, Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver, *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1804–1812, 2009.
- [6] A. A. Lambert, S. Cuevas, and J. A. del Río, Enhanced heat transfer using oscillatory flows in solar collectors, *Solar Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1296–1302, 2006.
- [7] C. D. Ho, H. M. Yeh, and R. C. Wang, Heat-transfer enhancement in double-pass flat-plate solar air heaters with recycle, *Energy*, vol. 30, no. 15, pp. 2796–2817, 2005.
- [8] J. A. Ackermann, L.-E. Ong, and S. C. Lau, Conjugate heat transfer in solar collector panels with internal longitudinal corrugated fins- Part II: Local results, *Forschung im Ingenieurwesen*, vol. 61, no. 6, pp. 172–179, 1995.
- [9] K. Sopian, M. A. Alghoul, E. M. Alfeqi, M. Y. Sulaiman, and E. A. Musa, Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 640–645, 2009.
- [10] G. Martinopoulos, D. Missirlis, G. Tsilingiridis, K. Yakinthos, and N. Kyriakis, CFD modeling of a polymer solar collector, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1499–1508, 2010.
- [11] S. K. Saha and D. Mahanta, Thermodynamic optimization of solar flat-plate collector, *Renewable Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 181–193, 2001.
- [12] S. Farahat, F. Sarhaddi, and H. Ajam, Exergetic optimization of flat plate solar collectors, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1169–1174, 2009.
- [13] M. Selmi, M. J. Al-Khawaja, and A. Marafia, Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector, *Renewable Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 383–387, 2008.
- [14] H. P. Garg, U. Rani, and R. Chandra, Optimization of fin and tube parameters in a flat-plate collector, *Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 83–92, 1981.
- [15] K. O. Lund, General thermal analysis of parallel-flow flat-plate solar collector absorbers, *Solar Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 443–450, 1986.
- [16] D. M. Ghamari and R. A. Worth, The effect of tube spacing on the cost-effectiveness of a flat-plate solar collector, *Renewable Energy*, vol. 2, no. 6, pp. 603–606, 1992.
- [17] Ç. Tiris, M. Tiris, and I. E. Türe, Effects of fin design on collector efficiency, *Energy*, vol. 20, no. 10, pp. 1021–1026, 1995.
- [18] M. AL-NIMR, S. KIWAN, and A. AL-ALWAH, Size optimization of conventional solar collectors, *Energy*, vol. 23, no. 5, pp. 373–378, 1998.
- [19] A. M. Shariah, A. Rousan, K. K. Rousan, and A. A. Ahmad, Effect of thermal conductivity of absorber plate on the performance of a solar water heater, *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 733–741, 1999.
- [20] E. Torres-Reyes, J. Cervantes-de Gortari, B. Ibarra-Salazar, and M. Picon-Núñez, A design method of flat-plate solar collectors based on minimum entropy generation, *Exergy, An International Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 46–52, 2001.
- [21] D. Mahanta and S. K. Saha, Internal irreversibility in a water heating solar flat plate collector, *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 17, pp. 2425–2435, 2002.
- [22] H. M. Yeh, C. D. Ho, and C. W. Yeh, Effect of aspect ratio on the collector efficiency of sheet-and-tube solar water heaters with the consideration of hydraulic dissipated energy, *Renewable Energy*, vol. 28, no. 10, pp. 1575–1586, 2003.



شکل ۹. کانتر حجمی دما برای حالت هفتم شبیه‌سازی



شکل ۱۰. کانتر حجمی دما برای حالت هشتم شبیه‌سازی

۵- نتیجه‌گیری

انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، می‌تواند پاسخی مناسب برای نگرانی‌های موجود در زمینه تغییرات آب و هوای جهانی باشد. در این میان، سیستم‌های کلکتور خورشیدی صفحه تخت به عنوان ابزاری برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی یکی از فناوری‌های تبدیل انرژی است که در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. افزایش راندمان کلکتورها می‌تواند در جهت رقابت‌پذیری این سیستم‌ها تأثیر بسزایی دارد. پارامترهای مختلفی در کارایی انرژی سیستم‌های کلکتور خورشیدی صفحه تخت موثر است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ضخامت کلکتور (صفحه جاذب)، قطر لوله‌های حامل سیال کاری و تعداد لوله‌ها (یا فاصله لوله‌ها از هم) اشاره کرد. در این پروژه، یک هندسه نوینی از کلکتور خورشیدی صفحه تخت که در آن لوله‌های حامل سیال به طور کامل درون صفحه جاذب قرار دارند توسط نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شد. برای بررسی تأثیر پارامترهای موثر در کارایی کلکتور، چندین هندسه مختلف از این نوع کلکتور که در آن قطر لوله‌ها، تعداد لوله‌ها و ضخامت صفحه جاذب متفاوت می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزایش قطر لوله‌ها، افزایش تعداد لوله‌ها و افزایش ضخامت صفحه جاذب همگی باعث بهبود کارایی سیستم کلکتور خورشیدی صفحه تخت می‌گردد. از طرفی، برای مقایسه عملکرد این نوع هندسه برای کلکتور خورشیدی با سیستم‌های کلکتور خورشیدی صفحه تخت معمول، هندسه‌ای دیگر برای کلکتور خورشیدی که در آن نصف لوله‌ها در بالای صفحه جاذب قرار دارند نیز در نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شد. نتایج مقایسه این دو نوع هندسه نشان داد که هندسه نوع اول در بهترین حالت شبیه‌سازی دارای راندمان انرژی ۵۹.۶۳ درصدی بوده و هندسه نوع دوم که در آن نصف لوله‌ها در بالای صفحه جاذب قرار دارند دارای راندمان ۶۷.۷۹ درصدی می‌باشد.