

Numerical Investigation of the Transient Performance of a Novel Hybrid Solar Air Heater with Phase Change Material, Porous Matrix, and External Air Recycling: A Case Study for Bojnord, Iran

Fatemeh Karami, Majid Sabzpooshani* 

Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: December 30, 2025
Revised: March 05, 2026
Accepted: March 22, 2026
ePublished: April 23, 2026

ABSTRACT

In this study, the transient energy and exergy performance of a novel solar air heater incorporating a phase change material (PCM), a porous matrix and an air recycling system was investigated based on the climatic data of Bojnord city using an analytical–numerical approach. Energy balance equations for the system components were derived analytically, and local temperature distributions along the channel and over time were computed. Three configurations were considered: a reference system without PCM and porous matrix, a system with PCM, and a combined system with both PCM and porous matrix. Results showed that PCM reduced thermal fluctuations and sustained heating during periods without solar radiation, with outlet air temperature approximately 6 °C higher than the reference system. Moreover, the porous matrix enhanced flow turbulence and heat transfer surface area, resulting in a more uniform thermal response. The analysis of mass flow rate effects in the combined system indicated that increasing the flow rate from 0.01 to 0.025 kg/s raised cumulative thermal efficiency from 48.02% to 65.88%, while cumulative exergy efficiency decreased from 3.58% to 1.82%, demonstrating that higher flow rates enhance heat recovery, whereas lower flow rates improve the quality of the output energy. The main novelty of this study lies in the simultaneous investigation of the effects of a phase change material (PCM) and a porous matrix in a solar air heater under Iranian climatic conditions. The findings suggest that the proposed system can be effectively applied for energy-efficient heating of residential and industrial buildings.

Keywords: solar air heater, Phase change material (PCM), Porous matrix, Cumulative energy and exergy analysis, Analytical–numerical approach

How to cite this article

Karami F, Sabzpooshani M, Numerical Investigation of the Transient Performance of a Novel Hybrid Solar Air Heater with Phase Change Material, Porous Matrix, and External Air Recycling: A Case Study for Bojnord, Iran. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(06):463-478.

*Corresponding author's email: spozshan@kashanu.ac.ir


*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-7739-1730



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی عددی عملکرد گذرای هواگرم کن ترکیبی خورشیدی جدید شامل ماده تغییرفازدهنده، ماتریس متخلخل و بازچرخش خارجی هوا_ مطالعه موردی شهر بجنورد

فاطمه کرمی، مجید سبزویشانی* 

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در این پژوهش، عملکرد انرژی و انرژی گذرای یک هواگرم کن خورشیدی جدید مجهز به ماده تغییر فازدهنده، ماتریس متخلخل و بازچرخش هوا، بر اساس داده‌های اقلیمی شهر بجنورد و با رویکرد تحلیلی-عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. معادلات موازنه انرژی اجزای مختلف سامانه به صورت تحلیلی استخراج شده و توزیع دماها در امتداد کانال و بر حسب زمان محاسبه شدند. سه پیکربندی شامل سامانه مرجع بدون ماده تغییر فازدهنده و ماتریس، سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده و سامانه ترکیبی دارای ماده تغییر فازدهنده همراه با ماتریس متخلخل بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فازدهنده موجب کاهش نوسانات حرارتی و تداوم گرمایش در غیاب تابش خورشید می‌شود، به گونه‌ای که دمای هوای خروجی حدود ۶ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سامانه مرجع باقی می‌ماند. همچنین، افزودن ماتریس متخلخل به ماده تغییر فازدهنده، با افزایش اغتشاش جریان و سطح تماس حرارتی، پاسخ حرارتی سامانه را یکنواخت‌تر می‌کند. بررسی اثر دبی جرمی در سامانه ترکیبی نشان داد که با افزایش دبی از ۰/۰۱ به ۰/۲۵ کیلوگرم بر ثانیه، بازده حرارتی تجمعی از ۴۸/۰۲٪ به ۶۵/۸۸٪ افزایش یافته در حالی که بازده انرژی تجمعی از ۳/۵۸٪ به ۱/۸۲٪ کاهش می‌یابد، که بیانگر افزایش برداشت حرارت در دبی‌های بالاتر و بهبود کیفیت انرژی خروجی در دبی‌های کمتر است. نوآوری اصلی این مطالعه در بررسی همزمان اثر ماده تغییر فازدهنده و ماتریس متخلخل در یک هواگرم کن خورشیدی تحت شرایط اقلیمی ایران نهفته است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه پیشنهادی می‌تواند برای کاربردهای عملی در گرمایش هوای ساختمان‌های مسکونی و صنعتی کم‌مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: هواگرم کن خورشیدی، ماده تغییر فازدهنده، ماتریس متخلخل، تحلیل تجمعی انرژی و انرژی گذرای، حل تحلیلی-عددی

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳

نحوه ارجاع به این مقاله

کرمی فاطمه، سبزویشانی مجید، بررسی عددی عملکرد گذرای هواگرم کن ترکیبی خورشیدی جدید شامل ماده تغییر فازدهنده، ماتریس متخلخل و بازچرخش خارجی هوا_ مطالعه موردی شهر بجنورد، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۴۰۵؛ ۲۶(۰۶): ۴۷۸-۴۷۳

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: spooshan@kashanu.ac.ir

*شناسه آرکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0001-7739-1730



۱- مقدمه

با افزایش مصرف انرژی در بخش‌های خانگی و صنعتی و تشدید پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توسعه سامانه‌های حرارتی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر تبدیل شده است. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل دسترسی گسترده، ماهیت پاک و امکان بهره‌برداری مستقیم در کاربردهای حرارتی دمای پایین، نقش مهمی در تأمین گرمایش ایفا می‌کند. از میان فناوری‌های مختلف بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، هواگرم‌کن‌های خورشیدی به سبب ساختار ساده، هزینه پایین و سهولت نگهداری، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند.

با وجود این مزایا، عملکرد حرارتی هواگرم‌کن‌های خورشیدی همچنان با چالش‌هایی نظیر انتقال حرارت محدود بین جریان هوا و صفحه جاذب، نوسانات عملکرد ناشی از تغییرات تابش خورشید و کوتاه بودن زمان حضور هوا در هواگرم‌کن مواجه است. از این رو، در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف تقویت فرآیند انتقال حرارت و بهبود پایداری دمایی این سامانه‌ها انجام شده است.

یکی از رویکردهای مؤثر، استفاده از بازچرخش جریان هوا است؛ این روش با بازگرداندن بخشی از هوای گرم خروجی به ورودی، علاوه بر افزایش مدت حضور هوا در مسیر جریان، دمای ورودی را بالا برده و بازده کل سامانه را بهبود می‌بخشد.

علاوه بر این، ساختارهای متخلخل به‌عنوان ابزار مؤثر برای افزایش نرخ انتقال حرارت شناخته شده‌اند. این ساختارها با افزایش سطح تماس مؤثر، ایجاد آشفتگی کنترل‌شده و تقویت اختلاط جریان، موجب افزایش محسوس نرخ انتقال حرارت می‌شوند؛ هرچند افزایش افت فشار ناشی از آن‌ها همچنان یکی از چالش‌های اصلی طراحی بهینه محسوب می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استقرار ماتریس متخلخل در مسیر عبور هوا می‌تواند دمای خروجی و نرخ جذب حرارت را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، اما تعیین نسبت بهینه میان افزایش انتقال حرارت و افت فشار نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است.

در این زمینه، انواع مختلفی از ساختارهای متخلخل از جمله ماتریس سیمی، بسترهای سنگی طبیعی و محیط‌های متخلخل سرامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ورما و همکاران [1] در پژوهش خود در مورد هواگرم‌کن‌های صفحه تخت مجهز به بستر سیمی گزارش کردند که طراحی هندسی و عمق بسته‌بندی ماتریس نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود انتقال حرارت و کاهش نوسانات دمای خروجی دارد. آن‌ها نشان دادند که انتخاب بهینه مشخصات ماتریس می‌تواند نرخ انتقال حرارت را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و عملکرد کل سامانه را در شرایط جریان کم و متوسط بهینه سازد.

احمدخانی و همکاران [2] اثر ترکیبی ماتریس و بازچرخش جریان هوا در کلکتور صفحه تخت دوگذر را بررسی کردند و نشان دادند که این ترکیب می‌تواند دمای خروجی و بازده حرارتی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد؛ اگرچه در شرایط نرخ جرمی و نسبت بازچرخش بالا، افت فشار و هزینه فن نیز افزایش می‌یابد.

همچنین، چوکسی و همکاران [3] با تحلیل پارامتری نظری، عمق بهینه بستر بسته در کلکتورهای صفحه تخت را بررسی کردند و دریافتند که افزایش عمق بستر تا حد مشخصی نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد، اما پس از آن افت فشار به‌طور تصاعدی افزایش یافته و کارایی ترموهیدرولیکی کاهش می‌یابد. این یافته‌ها اهمیت طراحی دقیق و بهینه‌سازی ابعاد بستر را برای دستیابی به عملکرد حرارتی مطلوب تأکید می‌کنند.

در مطالعات تجربی اخیر، اسماعیل و همکاران [4] با استفاده از سنگ آتشفشانی به‌عنوان بستر متخلخل در کلکتور دوگذر، دمای خروجی را تا حدود ۱۷.۵٪ افزایش دادند و بازده حرارتی کلکتور را در محدوده ۶۲-۶۴٪ گزارش کردند. این بستر علاوه بر ایجاد آشفتگی و افزایش سطح تماس، امکان ذخیره‌سازی حرارت محسوس کوتاه‌مدت را نیز فراهم می‌کند، که برای کاربردهای خشک‌کردن محصولات کشاورزی مناسب بود.

مطالعه فرزاد و زعیم [5] نشان داد که ماتریس‌های متخلخل طبیعی می‌توانند بازده حرارتی کلکتور دوگذر را در شرایط آزمایشی مشخص تا حدود ۷۲٪ برسانند، که این مسئله بر اهمیت افزایش زمان تماس هوا با سطح جاذب و پایداری دمای خروجی تأکید دارد.

در نهایت، فاتوم و همکاران [6] با بهره‌گیری از بستر سیمی مهندسی‌شده و تحلیل انرژی و انرژی‌ریزی، نشان دادند که این ماتریس‌ها با سطح ویژه بالا و پاسخ حرارتی سریع می‌توانند کارایی حرارتی کلکتور را به ۸۶٪ (در شرایط آزمایشی مشخص) برسانند. هرچند افزودن بستر سیمی موجب افزایش افت فشار و تلفات انرژی می‌شود، اما مزایای حاصل از بهبود انتقال حرارت و افزایش دمای خروجی به‌طور قابل توجهی بر این اثرات غلبه می‌کند و استفاده از آن را به‌عنوان یک راهکار مهندسی‌شده برای بهبود عملکرد کلکتورهای دوگذر توجیه می‌کند.

این پیشینه پژوهشی روشن می‌سازد که انتخاب و طراحی ساختارهای متخلخل، به ویژه ماتریس‌های مهندسی‌شده مانند بستر سیمی، می‌تواند نرخ انتقال حرارت و پایداری دمای خروجی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. چنین یافته‌هایی زمینه را برای ترکیب بستر متخلخل با دیگر فناوری‌ها، از جمله بازچرخش جریان هوا و استفاده از مواد تغییر فازدهنده، فراهم کرده و ضرورت مطالعه جامع سامانه‌های ترکیبی تأکید می‌کند.

در کنار راهکارهای ارتقای انتقال حرارت، مدیریت نوسانات حرارتی نیز اهمیت بسزایی دارد. با توجه به ماهیت متناوب تابش خورشیدی، استفاده از مواد تغییر فازدهنده به‌عنوان ذخیره‌ساز

مرور پیشینه مطالعات به روشنی نشان می‌دهد که هرچند هر یک از راهکارهای مطرح شده اعم از بهره‌گیری از ماتریس‌های متخلخل برای تقویت انتقال حرارت، استفاده از بازچرخش جریان هوا برای افزایش حضور سیال، و به‌کارگیری مواد تغییر فازدهنده برای تثبیت دمای خروجی توانسته‌اند بخشی از محدودیت‌های ذاتی کلکتورهای هواگرم‌کن را برطرف کنند، اما هیچ‌کدام به‌تنهایی پاسخگوی نیاز به بهبود هم‌زمان بازده حرارتی، پایداری دمایی و عملکرد ترموهیدرولیکی این سامانه‌ها نبوده‌اند. یافته‌های موجود نشان می‌دهد که محیط‌های متخلخل، با وجود افزایش قابل‌توجه نرخ انتقال حرارت، پس از قطع تابش خورشید به‌سرعت کارایی حرارتی خود را از دست می‌دهند. در مقابل، مواد تغییر فازدهنده علیرغم ظرفیت بالای ذخیره و آزادسازی حرارت نهان، به‌دلیل واکنش‌پذیری حرارتی محدود، توان پاسخ‌دهی سریع به نوسانات لحظه‌ای تابش خورشیدی را ندارند.

از سوی دیگر، بازچرخش جریان هوا می‌تواند دمای ورودی و میزان بازیابی حرارت را افزایش دهد، اما به‌تنهایی توان تضمین پایداری شرایط حرارتی سامانه را در دوره‌های کم‌تابش به‌طور کامل ندارد. این عدم یکنواختی در پاسخ‌دهی حرارتی سبب شده است که پژوهش‌های مستقل، اگرچه کارآمد، همچنان نتوانند رفتار واقعی کلکتورهای پیشرفته را در شرایط بهره‌برداری پویا توجیه کنند. با وجود اهمیت ترکیب فناوری‌های تقویت انتقال حرارت و تثبیت حرارتی، مطالعات موجود عمدتاً به بررسی ماتریس متخلخل یا مواد تغییر فازدهنده پرداخته‌اند و بررسی هم‌زمان این دو فناوری در کلکتورهای مجهز به بازچرخش جریان، به‌ویژه از دیدگاه عملکرد حرارتی، بازده انرژی و کارایی ترموهیدرولیکی، محدود است. این مطالعه تحلیل هم‌زمان ماتریس متخلخل با نقش تقویتی در انتقال حرارت لحظه‌ای و ماده تغییر فازدهنده با نقش تثبیت‌کنندگی حرارتی گذرا در یک هواگرم‌کن دارای بازچرخش خارجی جریان هوا تحت شرایط اقلیمی ایران ارائه می‌دهد و تأثیر ترکیبی آن‌ها بر بازده حرارتی، نرخ بازیابی حرارت و عملکرد انرژی‌سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهد. اهمیت این پژوهش در کشور ایران قابل توجه است، چرا که شرایط تابش خورشید و نوسانات دمای روزانه در بسیاری از مناطق کشور، پتانسیل بهره‌برداری بهینه از کلکتورهای خورشیدی پیشرفته را افزایش می‌دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای طراحی کلکتورهای خورشیدی با عملکرد بالا و کاربردهای عملی در ایران و سایر مناطق مشابه باشد.

حرارتی یکی از مؤثرترین فناوری‌ها برای پایداری عملکرد حرارتی سامانه مطرح شده است. مواد تغییر فازدهنده با ذخیره‌سازی حرارت نهان در ساعات اوج تابش و آزادسازی آن در دوره‌های کم‌تابش یا پس از غروب خورشید، موجب افزایش یکنواختی دمای خروجی، کاهش نوسانات و بهبود بازده انرژی روزانه می‌شوند. مطالعات اخیر به‌طور گسترده به ارزیابی عملکرد هواگرم‌کن‌های خورشیدی مجهز به مواد تغییر فازدهنده پرداخته‌اند. برای مثال، پالاسیو و همکاران [7] نشان دادند که افزودن ماده تغییر فازدهنده می‌تواند زمان تأمین حرارت مفید را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و دمای خروجی را تا چندین ساعت پس از قطع تابش پایدار نگه دارد. در یک تحلیل عددی، ورما و همکاران [8] نشان دادند که لایه ماده تغییر فازدهنده موجب کاهش محسوس نوسانات گذرای دما و افزایش انرژی مفید جمع‌آوری شده در طول روز می‌شود. همچنین، این مطالعه با توسعه یک مدل یک مدل عددی گذرا نشان داد که ماده تغییر فازدهنده قادر است بازده حرارتی روزانه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

سینگ و همکاران [9] در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که به‌کارگیری هم‌زمان هندسه بهبودیافته و ماده تغییر فازدهنده، در مقایسه با سامانه‌های فاقد این مواد، موجب افزایش چشمگیر ظرفیت ذخیره‌سازی حرارت و بهبود یکنواختی دمای خروجی می‌شود. این یافته بر ضرورت طراحی هماهنگ هندسه و بخش ذخیره‌ساز حرارتی تأکید دارد. از سوی دیگر، حرکت به سمت مواد پیشرفته‌تر نظیر نانو مواد تغییر فازدهنده نتایج قابل‌توجهی داشته است؛ چنان‌که گونش کومار و همکاران [10] با مطالعه یک صفحه جاذب موجدار نشان دادند که نانومواد تغییر فازدهنده ضمن افزایش رسانش مؤثر، فرآیند ذوب را تسریع کرده و شار حرارتی خروجی را نسبت به ماده تغییر فازدهنده خالص ارتقا می‌دهد.

در ادامه چوراسیا و همکاران [11] با بررسی محفظه موجدار حاوی ماده تغییر فازدهنده همراه با محیط متخلخل دریافتند که این ترکیب می‌تواند چگالی انرژی و توان حرارتی سامانه را افزایش داده و رفتار ذوب ماده تغییر فازدهنده را یکنواخت کند. افزون بر این، شارما و دبارما [12] نیز تأکید کردند که ادغام مواد تغییر فازدهنده با هندسه‌هایی مانند صفحات موجدار، بازیاب‌ها و محیط‌های متخلخل، مؤثرترین راهکار برای افزایش پایداری حرارتی در هواگرم‌کن‌های خورشیدی و در شرایط واقعی بهره‌برداری است. با توجه به گستردگی رویکردهای مطرح شده در مطالعات پیشین، ارائه یک جمع‌بندی ساختارمند به‌منظور تبیین جایگاه پژوهش حاضر ضروری است. جدول ۱، دسته‌بندی جامعی از سامانه‌های هواگرم‌کن خورشیدی بر اساس معیارهای اصلی طراحی و بهره‌برداری ارائه می‌دهد و نمای کلی از رویکردهای متداول در توسعه این سامانه‌ها فراهم می‌کند. این چارچوب، زمینه‌ای منسجم برای تعریف اهداف پژوهش حاضر ایجاد می‌کند.

جریان را یکنواخت‌تر کرده، نوسانات حرارتی را کاهش داده و عملکرد کلکتور را در ساعات مختلف روز پایدار می‌سازد. با هدف افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی، لایه ماده تغییر فازدهنده از نوع پارافین RT50 در زیر صفحه جاذب قرار داده شده است. این موقعیت باعث می‌شود در ساعات اوج تابش، بخشی از بار حرارتی جذب شده ذخیره و طی دوره‌های کاهش تابش به صورت تدریجی آزاد گردد. خواص مناسب RT50 از جمله دمای ذوب سازگار با شرایط محیطی، پایداری حرارتی مطلوب و ظرفیت انرژی نهان بالا، نوسانات دمای خروجی را کاهش داده و پیوستگی عملکرد حرارتی سیستم را افزایش می‌دهد.

به منظور تقویت انتقال حرارت جابجایی، یک بستر متخلخل فلزی از نوع M3 در کانال بالایی جریان تعبیه شده است. این ماتریس با ایجاد آشفتگی هدفمند و افزایش سطح تماس مؤثر، نرخ انتقال حرارت به هوا را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. اثر هم‌افزای بستر متخلخل، لایه ماده تغییر فازدهنده و کانال بازچرخش موجب تشکیل یک چرخه‌ی حرارتی بهینه می‌شود که در آن جذب حرارت، ذخیره‌سازی انرژی و یکنواخت‌سازی دما به صورت هماهنگ عمل می‌کنند.

مشخصات ماتریس متخلخل [2] در جدول ۲، خواص ماده تغییر فازدهنده [13] در جدول ۳، خواص نوری و ابعاد هندسی اجزای سامانه در جدول ۴ ارائه می‌شوند و به عنوان ورودی‌های اصلی مدل عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۲ مشخصات هندسی ماتریس متخلخل [2]

Table 2 Geometric characteristics of the packed bed matrix [2]

Type of matrix	d_w (mm)	p_t (mm)	n	P
M3	0.4	1	12	0.95

جدول ۳ خواص ماده تغییر فازدهنده RT50 [13]

Table 3 Properties of PCM RT50 [13]

Properties	
Melting	45 °C - 51 °C
Solidification	51 °C - 46 °C
Storage capacity (43-58 °C)	160 ± 7.5% $\frac{kJ}{kg}$
Specific heat capacity (both phases)	2 $\frac{kJ}{kg.K}$
Density (solid phase)	0.88 $\frac{kg}{l}$
Density (liquid phase)	0.76 $\frac{kg}{l}$
Thermal conductivity (both phases)	0.2 $\frac{W}{m.K}$
Expansion	12.5 %
Flash-point	>200 °C

۲-۱- فرضیات مدل‌سازی

برای ساده‌سازی مدل و امکان‌پذیر ساختن تحلیل عددی رفتار گذرای هواگرم‌کن خورشیدی مجهز به ماده تغییر فازدهنده و ماتریس متخلخل، مجموعه‌ای از فرضیات فیزیکی و هندسی اتخاذ شده است که در ادامه بیان می‌شود:

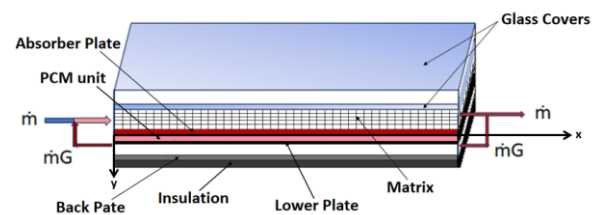
جدول ۱ دسته‌بندی سامانه‌های هواگرم‌کن خورشیدی

Table 1 Classification of solar air heater systems

Classification Criterion	Categories
Collector Type	- Evacuated tube collectors - Concentrating solar collectors - Flat-plate collectors
Thermal Storage Integration	- Systems incorporating thermal energy storage (TES) - Systems without TES
Number of Airflow Passes	- Single-pass arrangements - Double-pass arrangements - Multi-pass arrangements
Airflow Mechanism	- Passive solar air-heating systems - Active solar air-heating systems
Absorber Surface Geometry	- Turbulator-enhanced absorbers (ribs, fins, baffles, etc.) - Porous/permeable absorbers - Smooth absorbers
Airflow Passage Path	- Airflow over the absorber surface - Airflow beneath the absorber surface - Airflow along both sides of the absorber surface - Airflow through a porous absorber medium

۲- شرح مسئله

در این پژوهش، یک هواگرم‌کن خورشیدی با آرایش حرارتی پیشرفته، شامل سامانه بازچرخش خارجی جریان، بستر متخلخل فلزی و لایه ذخیره حرارتی مبتنی بر ماده تغییر فازدهنده، به صورت عددی مدل‌سازی شد. پیکربندی کلی کلکتور از دو پوشش شیشه‌ای شفاف، بستر متخلخل فلزی در کانال بالایی جریان، صفحه جاذب فولادی زیر بستر، لایه ماده تغییر فازدهنده زیر صفحه جاذب، صفحه پشتی صیقلی از فولاد ضدزنگ و لایه عایق در بخش تحتانی تشکیل شده است. این ساختار، امکان مدیریت هم‌زمان جذب، ذخیره و آزادسازی حرارت را فراهم کرده و شرایط لازم برای پایداری عملکرد حرارتی سامانه را مهیا می‌سازد (شکل ۱).



شکل ۱ پیکربندی هواگرم‌کن مورد بررسی

Fig. 1 Configuration of the investigated solar air heater

یکی از مؤلفه‌های کلیدی در این سامانه، کانال بازچرخش خارجی جریان است که بین محفظه ماده تغییر فازدهنده و صفحه پشتی تعبیه شده و بخشی از هوای گرم خروجی را به ناحیه ورودی بازمی‌گرداند. این بازچرخش کنترل شده، دمای هوای ورودی را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود جریان گرم‌تر با سطح زیرین ماده تغییر فازدهنده تماس بیشتری پیدا کند و انتقال حرارت به آن را بهبود یابد. حضور این کانال، افزون بر بهبود تبادل حرارتی، میدان

- حل مسئله به صورت گذرا انجام شده است تا تغییرات دمای محیط، شدت تابش خورشیدی و فرآیند ذوب/انجماد ماده تغییر فزاینده در طول شبانه روز به طور واقع بینانه مدل سازی شود.
- جریان هوا تراکم ناپذیر بوده و به صورت یک بعدی در راستای محور طولی کانال (x) در نظر گرفته شده است.
- انتقال حرارت هدایتی در ماده تغییر فزاینده فقط در راستای عمودی (محور y) لحاظ شده و هدایت جانبی در راستای x نسبت به هدایت عمودی کم اهمیت فرض گردیده است.
- خواص ترموفیزیکی هوا در دمای میانگین ثابت در نظر گرفته شده اند.
- با توجه به هدایت حرارتی بالا و ضخامت کم اجزای فلزی، گرادیان دمای قابل توجهی در ضخامت پوشش شیشه ای، صفحه جاذب، صفحه پشتی، صفحه پایینی ایجاد نمی شود.
- تابش خورشیدی ورودی به صورت تابعی از زمان و مطابق داده های اندازه گیری شده در هر ساعت اعمال شده است. اثر زاویه تابش مستقیماً مدل سازی نشده و تأثیر آن از طریق مقدار تابش دریافتی لحاظ شده است.

جدول ۴ خواص نوری و ابعاد هندسی اجزای سامانه

Table 4 Optical Properties and Geometrical Dimensions of the System Components

Components	Length (m)	Width (m)	Thickness (m)	Depth (m)	Transmissivity (τ)	Absorptivity (α)	Emissivity (ϵ)
Transparent cover	2.2	0.45	0.03	----	0.95	0.05	0.92
Matrix	2.2	0.45	----	0.06	----	0.95	0.9
Absorber plate	2.2	0.45	0.03	----	----	0.95	0.9
Lower plate	2.2	0.45	0.03	----	----	----	0.94
Back plate	2.2	0.45	0.03	----	----	----	0.94
Insulation	2.2	0.45	0.05	----	----	----	----
Channels 1, 2, and 3	2.2	0.45	----	0.06	----	----	----
PCM unit	2.2	0.45	----	0.02	----	----	----

که در آن h_{if} گرمای نهان ذوب یا انجماد ماده تغییر فزاینده و λ نسبت ذوب آن است.

۲-۳- ضرایب انتقال حرارت تشعشعی

در این مطالعه، تمامی صفحات اصلی کلکتور صاف، موازی و در فاصله کم از یکدیگر قرار دارند؛ بنابراین، ضریب دید بین سطوح برابر با ۱ فرض شده است. بر این اساس، ضرایب انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح با استفاده از رابطه عمومی ۵ مدل سازی می شوند [2]:

$$h_{r,i-j} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} - 1} \quad (5)$$

در رابطه اخیر، ϵ ضریب صدور سطوح (مطابق جدول ۱)، دما برحسب کلوین و σ ثابت استفان بولتزمن برابر با مقدار $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ است.

دمای مؤثر آسمان T_s به صورت دمای تابشی معادل در نظر گرفته شده و از رابطه تجربی ۶ تعیین می شود [14]:

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5} \quad (6)$$

۲-۴- ضریب انتقال حرارت جابه جایی

ضریب انتقال حرارت جابه جایی ناشی از جریان هوا روی پوشش شیشه ای بالایی از رابطه ۷ محاسبه می شود [14]:

$$h_w = 5.7 + 3.8V \quad (7)$$

که در آن V سرعت باد است و مقدار آن برابر ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۲-۲- معادلات حاکم

مدل سازی حرارتی هوا گرم کن خورشیدی بر پایه اصل پایستگی انرژی و با استفاده از رویکرد حجم کنترل انجام شده است. برای نمونه، سه حجم کنترل شامل پوشش شیشه ای بالایی، جریان هوا در کانال اصلی و لایه ماده تغییر فزاینده در شکل ۲ نشان داده شده اند، که مسیرهای شار حرارتی مرتبط با هر المان در آن ها مشخص است.

معادلات انرژی برای کلیه اجزای سامانه، شامل پوشش های شیشه ای، صفحه جاذب، جریان هوا در کانال های اصلی و بازچرخش، لایه ماده تغییر فزاینده، صفحات پایینی و پشتی و بستر متخلخل تدوین شده اند. در این بخش، تنها معادلات کلیدی و تعیین کننده رفتار حرارتی سامانه ارائه می شوند و سایر روابط در پیوست A آورده شده اند.

• جریان هوا در کانال اصلی (کانال دو)

$$\frac{\dot{m}(1+G)C_p}{w} \frac{dT_{f2}}{dx} = h_{c,gl-f2}(T_{gl}-T_{f2}) + h_{c,m-f2}(T_m - T_{f2}) + h_{c,p-f2}(T_p - T_{f2}) \quad (1)$$

• جریان هوا در کانال بازچرخش (کانال سه)

$$\frac{\dot{m}G C_p}{w} \frac{dT_{f3}}{dx} = h_{c,b-f3}(T_b - T_{f3}) + h_{c,lp-f3}(T_{lp} - T_{f3}) \quad (2)$$

• ماده تغییر فزاینده در فاز مایع یا جامد

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c_{PCM} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

• ماده تغییر فزاینده در ناحیه تغییر فاز

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \rho c_{PCM} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$$G_0 = \frac{\dot{m}}{A_f P} \quad (11)$$

در این روابط، قطر سیم‌های تشکیل‌دهنده ماتریس، \dot{m} دبی جریان هوا، A_f سطح مقطع کانال دارای ماتریس و P تخلخل بستر هستند. تخلخل بستر با استفاده از رابطه تجربی ۱۲ تعیین می‌شود [16]:

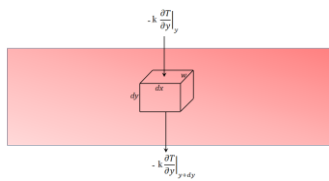
$$P = \frac{p_t^2 d - \left[\frac{\pi}{2} (d_w)^2 p_t\right] n}{p_t^2 d} \quad (12)$$

در رابطه، p_t گام ماتریس، d_w قطر سیم و n تعداد لایه‌های ماتریس است. d عمق بستر ماتریس بوده که برابر با عمق کانال در نظر گرفته شده و در جدول ۱ ارائه شده است.

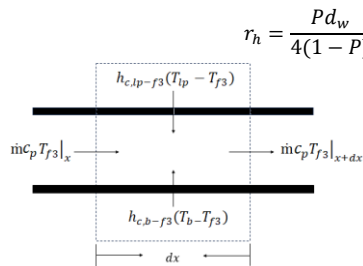
با توجه به روابط بیان شده، ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر یک از کانال‌ها بر اساس عدد ناسلت متناظر محاسبه می‌شود.

این ضریب در کانال‌هایی که فاقد بستر متخلخل باشد از رابطه ۱۳ به دست می‌آید [2].

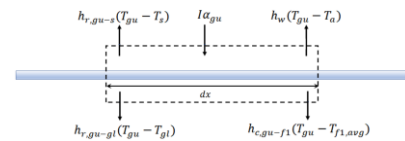
$$h = \frac{Nu k_f}{D_h} \quad (13)$$



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲) موازنه انرژی حجم‌های کنترل دیفرانسیلی در اجزای سامانه شکل الف) پوشش شیشه‌ای بالایی، ب) هوای عبوری از کانال بازچرخش، ج) ماده تغییرفازدهنده

Fig.2 Energy Balance of Differential Control Volumes in the System Components, a) Glass cover b) Recirculating air channel c) Phase change material

$$J_H = 0.64 \left(\frac{1}{nP} \left(\frac{p_t}{d_w} \right) \right)^{2.104} Re_m^{-0.55} \quad (17)$$

۲-۵- شرایط مرزی

• جریان هوا: دمای ورودی هوا به کانال اصلی و کانال بازچرخش با در نظر گرفتن ضریب بازچرخش G ، به ترتیب از روابط ۱۸ و ۱۹ تعیین می‌شود:

$$T_{f2}(x=0, t) = \frac{T_a + G T_{f3}(x=L, t)}{1 + G} \quad (18)$$

$$T_{f3}(x=0, t) = T_{f2}(x=L, t) \quad (19)$$

همچنین، دبی جرمی جریان هوا در این دو کانال به ترتیب از روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_{f2} = (1 + G)\dot{m} \quad (20)$$

$$\dot{m}_{f3} = G\dot{m} \quad (21)$$

• ماده تغییرفاز دهنده: این لایه تحت تبادل حرارت با صفحه جاذب و صفحه پایینی محفظه قرار دارد:

$$-k_{PCM} \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0,H} = \text{heat flux from adjacent solid surfaces} \quad (22)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی در کانال ساده بازچرخش، ابتدا عدد ناسلت بر اساس رژیم جریان و خواص ترموفیزیکی سیال تعیین می‌شود. جریان هوا در ورودی کانال به صورت کاملاً توسعه‌یافته فرض شده است. روابط کامل عدد ناسلت برای جریان آرام، گذار و آشفتنه و همچنین محاسبه قطر هیدرولیکی کانال در پیوست B ارائه شده است [15].

برای کانال دارای ماتریس (کانال اصلی جریان هوا)، انتقال حرارت جابجایی متفاوت بوده و استفاده از روابط کلاسیک کافی نیست. در این حالت عدد ناسلت جریان با استفاده از رابطه تجربی ۸ محاسبه می‌شود [16]:

$$Nu_m = 0.2 Re_m^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

در این رابطه، Re_m عدد رینولدز مؤثر جریان در کانال دارای ماتریس است [16]:

$$Re_m = \frac{4r_h G_0}{\mu} \quad (9)$$

که در آن r_h شعاع هیدرولیکی مؤثر کانال دارای ماتریس و G_0 سرعت جرمی جریان هوا در این نوع کانال است و با روابط ۱۰ و ۱۱ تعیین می‌شوند [16]:

$$r_h = \frac{P d_w}{4(1-P)} \quad (10)$$

که در آن، k_f ضریب هدایت حرارتی سیال، D_h قطر هیدرولیکی کانال است.

در کانال‌های دارای ماتریس، مکانیسم انتقال حرارت جابجایی متفاوت از کانال‌های ساده بوده و رابطه ۱۳ اعمال نمی‌شود. در این حالت، ضریب جابجایی بین دیواره‌ها و جریان سیال به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود [2]:

$$h_{c,gl-f} = h_{c,p-f} = \frac{Nu_m k_f}{P D_h} \quad (14)$$

و ضریب جابجایی بین ماتریس و جریان سیال از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود [16].

$$h_{c,m-f} = St_m G_0 c_p \quad (15)$$

عدد استانتون اصلاح شده، St_m ، برای جریان عبوری از ماتریس با استفاده از عدد پرانتل و فاکتور کولبرن J_H تعیین می‌شود [16]:

$$St_m = J_H Pr^{-\frac{2}{3}} \quad (16)$$

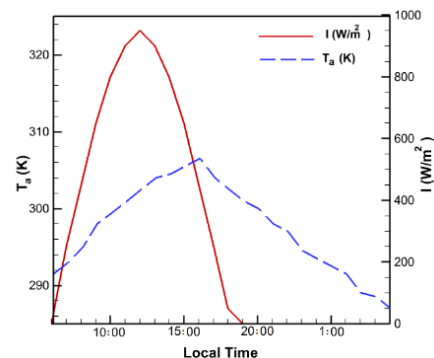
مقدار J_H به ویژگی‌های هندسی بستر متخلخل وابسته بوده و از رابطه تجربی ۱۷ محاسبه می‌شود [16]:

۶-۲- شرایط اولیه

در ابتدای شبیه‌سازی، دمای تمامی اجزای جامد و جریان هوا برابر با دمای محیط در نظر گرفته شده و ماده تغییر فزاینده در حالت جامد قرار دارد.

۷-۲- شرایط محیطی

به‌منظور شبیه‌سازی واقع‌گرایانه عملکرد گذرای هواگرم‌کن خورشیدی، شرایط محیطی بر اساس داده‌های هواشناسی شهر بجنورد در تاریخ ۵ ژوئیه ۲۰۱۶ در نظر گرفته شد. تغییرات ساعتی دمای محیط و شدت تابش خورشیدی طی یک دوره ۲۴ ساعته، به‌صورت شرایط مرزی وابسته به زمان در مدل اعمال گردید [17]. شدت تابش خورشیدی در هر بازه زمانی یک‌ساعته ثابت فرض شد و مقدار آن برابر با داده اندازه‌گیری شده متناظر همان ساعت در نظر گرفته شد. همچنین تابش به‌صورت عمود بر صفحه جاذب اعمال گردید. دمای هوای ورودی به کانال هواگرم‌کن نیز در هر بازه زمانی یک‌ساعته ثابت بوده و برابر با دمای محیط همان ساعت لحاظ شد. اعمال شرایط مرزی پله‌ای مبتنی بر داده‌های واقعی اقلیمی، امکان بررسی رفتار گذرا سامانه در مقیاس زمانی روزانه و پیش‌بینی قابل اعتماد عملکرد حرارتی هواگرم‌کن تحت شرایط واقعی بهره‌برداری را فراهم می‌کند.



شکل ۳ تغییرات شدت تابش خورشیدی و دمای محیط در بازه ۲۴ ساعته در شهر بجنورد، ایران (۵ ژوئیه ۲۰۱۶) [17]

Fig. 3 Hourly Variation of Solar Irradiance and Ambient Temperature in Bojnord, Iran (July 5, 2016)

۳- روش حل عددی و گسسته‌سازی

برای مدل‌سازی انتقال حرارت گذرا در هواگرم‌کن خورشیدی با حضور هم‌زمان ماتریس متخلخل و ماده تغییر فزاینده، معادلات انرژی اجزا و جریان هوا با روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل گسسته‌سازی و به صورت گذرا حل شدند.

۱-۳- گسسته‌سازی فضایی و زمانی

اجزای جامد سامانه شامل پوشش‌های شیشه‌ای، صفحه جاذب، ماتریس متخلخل و صفحات پایینی و پشتی، به‌صورت یک‌بعدی در راستای طول کلکتور گسسته شدند. لایه ماده تغییر فزاینده علاوه

بر طول، در راستای ضخامت نیز گسسته شد تا فرآیند ذوب و انجماد به‌دقت مدل شود.

دمای هوا در کانال‌ها با استفاده از تقریب آپ‌وایند مبتنی بر تفاضل پسر و نسبت به جهت جریان و به‌صورت گره‌به‌گره از ورودی به خروجی محاسبه شد، در حالیکه در معادلات حاکم بر ماده تغییر فزاینده، مشتق زمانی دما با استفاده از طرح تفاضل پیشرو جایگزین گردید.

در تمامی اجزا، دماها در هر گام زمانی به صورت حل ترتیبی مکانی-زمانی به‌روزرسانی می‌شوند؛ یعنی تغییر دمای یک گره بلافاصله بر گره‌ها و اجزای مجاور در همان گام زمانی تأثیر می‌گذارد. این روش، پایه‌ای برای پیاده‌سازی روش نیمه‌ضمنی محسوب می‌شود، به‌طوری‌که برخی ترم‌ها با مقادیر به‌روز شده در گام $n+1$ و برخی با مقادیر قبلی گام n محاسبه می‌شوند.

با توجه به استفاده از روش نیمه‌ضمنی، حل عددی از نظر پایداری زمانی با محدودیت سختی مواجه نبود؛ با این حال، گام زمانی به‌گونه‌ای انتخاب شد که تغییرات دما در هر گام به‌صورت نرم و همگرا محاسبه گردد. بررسی‌ها نشان داد که کاهش بیشتر گام زمانی تأثیر محسوس بر نتایج نهایی نداشت.

به‌منظور ارائه نمونه‌ای از نحوه گسسته‌سازی، معادلات گسسته‌شده موازنه انرژی جریان هوا در کانال‌های اصلی و بازچرخش به‌ترتیب در روابط ۲۳ و ۲۴ ارائه شده‌اند.

$$T_{f2}^{n+1}(x_i) = \frac{1}{\frac{\dot{m}(1+G)c_p}{w(x_i-x_{i-1})} + (h_{c,gl-f2} + h_{c,p-f2} + h_{c,m-f2})} \times \left[\left(\frac{(1+G)\dot{m}c_p}{w(x_i-x_{i-1})} \right) T_{f2}^{n+1}(x_{i-1}) + h_{c,p-f2} T_p^n(x_i) + h_{c,gl-f2} T_{gl}^n(x_i) + h_{c,m-f2} T_m^{n+1}(x_i) \right] \quad (23)$$

$$T_{f3}^{n+1}(x_i) = \frac{1}{\frac{\dot{m}Gc_p}{w(x_i-x_{i+1})} + (h_{c,lp-f3} + h_{c,b-f3})} \times \left[\left(\frac{\dot{m}Gc_p}{w(x_i-x_{i+1})} \right) T_{f3}^{n+1}(x_{i+1}) + h_{c,lp-f3} T_{lp}^{n+1}(x_i) + h_{c,b-f3} T_b^n(x_i) \right] \quad (24)$$

۲-۳- روند محاسباتی

به‌منظور حل معادلات حاکم و شبیه‌سازی رفتار حرارتی هواگرم‌کن‌های خورشیدی مورد مطالعه، یک کد عددی در محیط نرم‌افزار متلب توسعه داده شد. این کد با دریافت مشخصات هندسی سامانه، خواص ترموفیزیکی اجزا، شرایط محیطی و پارامترهای جریان، معادلات انرژی اجزای مختلف هواگرم‌کن و جریان هوا را به‌صورت کوپل شده و گذرا حل می‌کند.

در آغاز محاسبات، پارامترهای ورودی شامل ابعاد هندسی، مشخصات کلکتور و محفظه ماده تغییر فزاینده، خواص حرارتی

جدول 5 نتایج آزمون استقلال شبکه

Table 5 Grid Independence Test Results

Mesh Size	No of nodes	TPCM (K)	Relative error (%)	Tout (K)	Relative error (%)
11×20	2200	305.79		334.55	
275×20	5500	305.79	0.0009	334.55	0.0006
275×40	11000	305.57	0.072	334.07	0.15
275×80	22000	305.60	0.007	334.78	0.21
275×120	33000	305.64	0.014	335.21	0.13

۴- شاخص‌های عملکرد حرارتی و ترموهیدرولیکی

در تحلیل ترمودینامیکی سامانه‌های حرارتی، تمایز بین کمیت و کیفیت انرژی اهمیت اساسی دارد. کمیت انرژی که با بازده حرارتی سنجیده می‌شود، بیانگر میزان انرژی قابل برداشت است. در مقابل، کیفیت انرژی که با بازده انرژی ارزیابی می‌گردد، به قابلیت انجام کار مفید توسط آن انرژی اشاره دارد. یک جریان هوای با دمای بالاتر، کیفیت انرژی بالاتری دارد؛ زیرا اختلاف دمای بیشتری با محیط ایجاد کرده و پتانسیل بیشتری برای انتقال حرارت به کاربردهای با دمای بالاتر خواهد داشت. بنابراین، عبارت کیفیت انرژی خروجی که در این پژوهش به کار رفته، معادل همان مفهوم انرژی بوده و بیانگر درجه قابلیت استفاده انرژی خروجی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک است.

به منظور ارزیابی جامع عملکرد هواگرم کن خورشیدی مجهز به ماده تغییرفازدهنده و ماتریس، استفاده از بازده‌های لحظه‌ای حرارتی و انرژی به تنهایی کافی نیست؛ زیرا سامانه قادر است انرژی حرارتی را ذخیره کرده و حتی در ساعات کم تابش یا بدون تابش آزاد نماید. از این رو، شاخص‌های تجمعی به عنوان معیار اصلی ارزیابی عملکرد بلندمدت سیستم در نظر گرفته شدند.

کلید محاسبات طی یک دوره ۱۵ ساعته روز کاری (از ساعت ۶ صبح تا ۹ شب) انجام شده است.

۴-۱- بازده حرارتی تجمعی

بازده حرارتی تجمعی به صورت نسبت کل انرژی حرارتی مفید تولید شده به کل انرژی تابشی دریافتی کلکتور در طول دوره محاسباتی تعریف می‌شود:

$$\eta_{th,cum} = \frac{\sum Q_u \Delta t}{\sum I A_{co} \Delta t} \quad (25)$$

که در آن Q_u توان حرارتی مفید، Δt گام زمانی، I شدت تابش خورشید، A_{co} سطح کلکتور می‌باشد.

توان حرارتی مفید سامانه با در نظر گرفتن کانال اصلی و کانال بازچرخش به صورت رابطه ۲۶ محاسبه می‌شود [18]:

$$Q_u = \dot{m}(1+G)c_p(T_{f2@x=L} - T_{f2@x=0}) + \dot{m}Gc_p(T_{f3@x=L} - T_{f3@x=0}) \quad (26)$$

که در آن \dot{m} نرخ جرمی جریان هوای تازه، G ضریب بازگشت، c_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، T_{f2} و T_{f3} دمای جریان هوا در کانال اصلی و کانال بازچرخش هستند.

۴-۲- بازده انرژی تجمعی

بازده انرژی تجمعی نسبت کل انرژی حرارتی مفید دریافتی توسط جریان هوا به کل انرژی ورودی ناشی از تابش خورشید است [19]:

مواد، ضرایب جذب و نشر سطوح و شرایط محیطی تعریف شده و مقادیر اولیه دما برای هوا، سطوح جامد و ماده تغییر فازدهنده اعمال می‌شود. پس از تعریف شبکه محاسباتی در راستای مکان و زمان، فرآیند حل به صورت گام به گام زمانی آغاز می‌گردد.

در هر گام زمانی، حل معادلات به صورت گره به گره در امتداد کانال انجام می‌شود. ابتدا دمای ماتریس متخلخل محاسبه شده و سپس تبادل حرارت میان ماتریس، جریان هوا، پوشش‌های شیشه‌ای و صفحه جذب در نظر گرفته می‌شود. دماهای اجزای مذکور بر اساس معادلات موازنه انرژی به روزرسانی می‌گردند.

مدل سازی رفتار حرارتی ماده تغییر فازدهنده بر مبنای حل مستقیم معادله انرژی گذرا همراه با رهگیری وضعیت فازی موضعی انجام شده است. در هر گره و هر گام زمانی، با مقایسه دمای محلی با دماهای ذوب و انجماد، ناحیه تک فازی یا دوفازی تشخیص داده می‌شود. در نواحی تک فازی، معادله انرژی متناظر با فاز جامد یا مایع حل شده و دما به روزرسانی می‌گردد، در حالی که در بازه دوفازی، اثر گرمای نهان از طریق محاسبه و به روزرسانی کسر ذوب شدگی لحاظ می‌شود. این رویکرد امکان مدل سازی پیوسته فرآیند ذوب و انجماد را بدون نیاز به جبهه فازی صریح فراهم می‌کند.

پس از آن، دمای صفحه پایینی محفظه محاسبه شده و ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تشعشعی در تمامی مراحل، متناسب با دماهای به روز شده، باز محاسبه می‌شوند. در کانال بازچرخش، به دلیل جهت مخالف جریان، فرآیند حل از انتهای کانال آغاز شده و به سمت ورودی ادامه می‌یابد؛ همین رویه برای صفحه پشتی نیز اعمال می‌شود.

پس از اتمام گام‌های زمانی، توزیع دماهای اجزا و پارامترهای عملکردی سامانه شامل توان حرارتی مفید، بازده حرارتی و افت فشار استخراج می‌شوند.

۳-۳- استقلال از شبکه

برای اطمینان از صحت نتایج و عدم وابستگی به اندازه شبکه، آزمون استقلال شبکه انجام شد. تعداد گره‌ها در راستای جریان و ضخامت ماده تغییر فازدهنده در شبکه‌های مختلف بررسی شد و اثر آن بر دمای هوای خروجی و دمای ماده تغییر فازدهنده مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج نشان داد با افزایش تعداد گره‌ها، تغییرات دما کاهش یافته و نتایج تقریباً ثابت می‌شوند. برای نمونه، اختلاف دمای ماده تغییر فازدهنده و دمای هوای خروجی بین شبکه‌های ۱۱۰۰۰ و ۲۲۰۰۰ گره کمتر از ۰.۱٪ و ۰.۰۵ K بود. بنابراین، تعداد ۲۲۰۰۰ گره (۲۷۵×۸۰) برای شبیه سازی انتخاب شد که دقت کافی را فراهم کرده و زمان محاسباتی را بهینه می‌کند (جدول ۵).

و توان واقعی مصرفی فن با در نظر گرفتن راندمان فن و راندمان مکانیکی به صورت زیر به دست می آید [18]:

$$P_{fan} = \frac{P_{flow}}{\eta_{fan}\eta_{mec}} \quad (34)$$

که در آن راندمان فن $\eta_{fan} = 0.7$ و راندمان مکانیکی $\eta_{mec} = 0.9$ در نظر گرفته شده است [2].

۵- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت مدل عددی توسعه یافته، اعتبارسنجی به صورت مرحله ای و با استفاده از داده های مرجع انجام شد. از آنجا که سامانه مورد مطالعه شامل ماتریس متخلخل در مسیر جریان هوا و محفظه دارای ماده تغییر فزاینده زیر جاذب است، هر زیرمدل به طور مستقل اعتبارسنجی شد.

در مرحله نخست، عملکرد هواگرم کن خورشیدی در حضور ماتریس متخلخل با نتایج ارائه شده توسط احمدخانی و همکاران [2] مقایسه شد. دمای هوای خروجی از کانال دوم در شرایط مختلف دبی جرمی و ضرایب بازگشت تطابق مناسبی با داده های مرجع داشت (جدول ۶) و اختلاف کمتر از چند دهم کلوین، صحت معادلات حاکم و دقت مدل عددی را تأیید نمود.

در مرحله دوم، هواگرم کن خورشیدی مجهز به محفظه حاوی ماده تغییر فزاینده با نتایج شبیه سازی گزارش شده توسط مرادی و همکاران [17] اعتبارسنجی شد. مقایسه تغییرات دمای هوای خروجی در طول روز (شکل ۴) نشان دهنده تطابق قابل قبول بین نتایج مطالعه حاضر و داده های مرجع است که بیانگر صحت مدل سازی فرآیند ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی می باشد.

نتایج اعتبارسنجی تأکید می کند که مدل عددی حاضر قادر است رفتار حرارتی سامانه ترکیبی ماتریس و ماده تغییر فزاینده را با دقت بالا پیش بینی کرده و پایه ای مطمئن برای تحلیل عملکرد هواگرم کن خورشیدی فراهم کند.

جدول ۶ اعتبارسنجی هواگرم کن مجهز به ماتریس با نتایج احمدخانی و همکاران [2]

\dot{m} (kg/s)	G	Tout	
		Ahmadkhani et al.	Present study
0.015	0.1	319.32	319.22
	0.5	320.34	320.20
	1	321.19	320.92
0.025	0.1	312.77	312.70
	0.5	313.37	313.24
	1	313.89	313.71

$$\eta_{ex,cum} = \frac{\sum \dot{E}x_u \Delta t}{\sum I A_{co} \Psi \Delta t} \quad (27)$$

که در آن Ψ راندمان انرژی تابش بوده و مطابق رابطه ۲۸ محاسبه می شود [19]:

$$\Psi = 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \quad (28)$$

$\dot{E}x_u$ توان انرژی مفید سامانه با لحاظ توان مصرفی فن در هر دو کانال به صورت رابطه ۲۹ بیان می شود [19]:

$$\begin{aligned} \dot{E}x_u = & \dot{m}(1+G)c_p \left((T_{f2@x=L} - T_{f2@x=0}) \right. \\ & - T_a \ln \left(\frac{T_{f2@x=L}}{T_{f2@x=0}} \right) \left. - \frac{T_a}{T_{f2@x=0}} P_{fan2} \right. \\ & + \dot{m}Gc_p \left((T_{f3@x=L} - T_{f3@x=0}) \right. \\ & \left. - T_a \ln \left(\frac{T_{f3@x=L}}{T_{f3@x=0}} \right) \right) - \frac{T_a}{T_{f3@x=0}} P_{fan3} \end{aligned} \quad (29)$$

که در آن P_{fan2} و P_{fan3} به ترتیب بیانگر توان مصرفی فن در کانال های جریان اصلی و بازچرخش می باشند.

این روش محاسباتی اثرات ذخیره و آزادسازی انرژی توسط ماده تغییر فزاینده و تغییرات تابش خورشیدی را به طور کامل لحاظ می کند و تصویر جامع و واقعی از عملکرد بلندمدت سامانه ارائه می دهد.

۴-۳- افت فشار جریان هوا و توان پمپاژ

از آنجا که توان مصرفی فن مستقیماً در محاسبه بازده انرژی سامانه لحاظ می شود، مدل سازی افت فشار جریان هوا در کانال های هواگرم کن ضروری است. افت فشار تابعی از نرخ جریان جرمی، خواص ترموفیزیکی هوا، هندسه کانال و حضور ماتریس متخلخل بوده و به صورت مجزا برای کانال های دارای ماتریس و بدون ماتریس محاسبه شده است.

برای کانال های بدون ماتریس، افت فشار اصطکاکی با استفاده از رابطه ۳۰ محاسبه می شود [20]:

$$\Delta P_{s,d} = \frac{2\rho f v^2 L}{D_h} \quad (30)$$

در این رابطه f ضریب اصطکاک است که به عدد رینولدز جریان وابسته می باشد؛ فرم دقیق آن در پیوست B ارائه شده است [20]. در کانال های حاوی ماتریس متخلخل، اثر مقاومت هیدرولیکی بستر لحاظ شده و افت فشار به صورت رابطه ۳۱ مدل سازی می شود [20]:

$$\Delta P_{p,d} = f_m \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) \left(\frac{L}{r_h} \right) \quad (31)$$

که در آن f_m ضریب افت وابسته به ویژگی های ساختاری ماتریس بوده و به صورت تجربی از رابطه ۳۲ محاسبه می گردد [20]:

$$f_m = 2.484 \left(\frac{1}{n_p} \left(\frac{p_t}{d_w} \right) \right)^{0.699} Re_m^{-0.44} \quad (32)$$

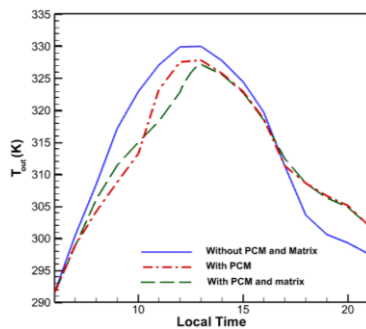
پس از تعیین افت فشار در هر کانال، توان هیدرولیکی مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت جریان هوا از رابطه ۳۳ محاسبه می شود [18]:

$$P_{flow} = \frac{\dot{m}(1+G)(\Delta P_{p,d})}{\rho_{f2}} + \frac{\dot{m}G(\Delta P_{s,d})}{\rho_{f3}} \quad (33)$$

زودتر فرآیند ذوب ماده تغییر فازدهنده در پیکربندی بدون ماتریس و ورود سریع‌تر سیستم به ناحیه‌ی گرمایش محسوس بود (شکل ۶)، به گونه‌ای که سهم عمده‌ای از انرژی ورودی مستقیماً صرف افزایش دمای جریان هوا شد. در مقابل، در سامانه‌ی دارای ماتریس، جذب اولیه انرژی توسط ماتریس متخلخل و توزیع تدریجی آن، موجب تأخیر در تکمیل ذوب و افزایش دمای خروجی با شیبی ملایم‌تر گردید.

این رفتار بیانگر پاسخ حرارتی یکنواخت‌تر و پایدارتر در سامانه‌ی دارای ماتریس بود که از افزایش ناگهانی دما جلوگیری کرد. از این رو، اگرچه به کارگیری ماتریس متخلخل در برخی ساعات موجب کاهش مقدار دمای خروجی شد، اما با یکنواخت‌سازی شیب تغییرات دما و افزایش پایداری حرارتی سامانه، عملکرد آن را برای کاربردهایی با نیاز به گرمایش تدریجی، پیوسته و قابل کنترل—نظیر گلخانه‌ها، ساختمان‌های کم‌مصرف انرژی و سامانه‌های تهویه خورشیدی—به طور محسوس بهبود بخشید.

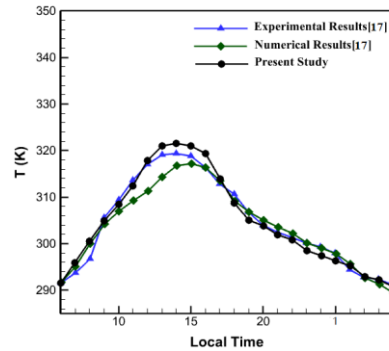
در ساعات بعدازظهر و با کاهش شدت تابش خورشیدی، نقش ماده تغییر فازدهنده در حفظ دمای هوای خروجی برجسته‌تر شد. به گونه‌ای که در زمان قطع کامل تابش خورشیدی (حدود ساعت ۱۹)، دمای خروجی سامانه‌های دارای ماده تغییر فازدهنده حدود ۶ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سامانه‌ی مرجع گزارش شد. این اختلاف در ساعت ۲۱ به حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت که نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای ماده تغییر فازدهنده در ذخیره و آزادسازی تدریجی انرژی حرارتی بود (شکل ۵).



شکل ۵ تغییرات دمای هوای خروجی در سه پیکربندی هواگرم کن در طول

روز کاری برای $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ و $G = 0.5$

Fig. 5 Variation of outlet air temperature in three solar air heater configurations over the operational day for $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ and $G = 0.5$



شکل ۴ اعتبارسنجی هواگرم کن مجهز به ماده تغییر فازدهنده با نتایج مرادی و همکاران [17]

Fig. 4 Validation of the PCM Solar Air Heater with Moradi et al. [17]

۶- تحلیل نتایج

برای بررسی تأثیر حضور ماتریس متخلخل و ماده تغییر فازدهنده بر عملکرد هواگرم کن خورشیدی، تغییرات دمای هوای خروجی در سه پیکربندی شامل: هواگرم کن ساده با بازچرخش خارجی جریان (حالت مرجع)، هواگرم کن مجهز به ماده تغییر فازدهنده بدون ماتریس متخلخل با بازچرخش و هواگرم کن مجهز به ماده تغییر فازدهنده با ماتریس متخلخل و بازچرخش، در دبی جرمی ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه و ضریب بازچرخش ۰/۵ مقایسه شد (شکل ۵). برای دو پیکربندی دارای ماده تغییر فازدهنده، تغییرات نسبت ذوب ماده نیز بر حسب زمان در شکل ۶ ارائه شد تا روند ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی به وضوح نمایش داده شود.

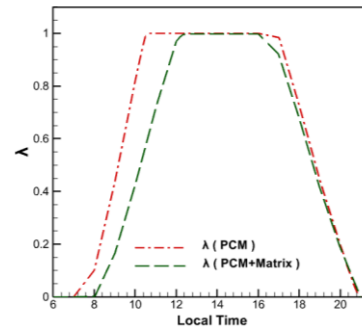
بررسی نتایج نشان داد که تا حوالی ساعت ۱۶، سامانه مرجع به دلیل تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی دریافتی به گرمایش هوا، بیشترین دمای خروجی را دارا بود. در سامانه‌های دارای ماده تغییر فازدهنده، سهمی از انرژی ورودی صرف فرآیند شارژ حرارتی این ماده شده و این موضوع موجب کاهش دمای هوای خروجی در بازه دریافت تابش گردید. با کاهش تابش خورشیدی و نبود مکانیسم ذخیره‌سازی حرارتی در سامانه مرجع، افت محسوس‌تر دمای خروجی نسبت به سامانه‌های دارای ماده تغییر فازدهنده مشاهده شد.

در این میان، نحوه‌ی توزیع و مسیر انتقال انرژی حرارتی در سامانه‌های دارای ماده تغییر فازدهنده، نقش تعیین‌کننده‌ای در روند تغییرات دمای هوای خروجی داشت. به طور مشخص، در ساعات ابتدایی روز، حضور ماتریس متخلخل با افزایش اغتشاش جریان و تقویت انتقال حرارت جابه‌جایی، سبب شد بخشی از انرژی خورشیدی دریافتی به طور مؤثرتری به جریان هوا منتقل شده و سبب افزایش نسبی دمای خروجی در مقایسه با حالت فاقد ماتریس گردد.

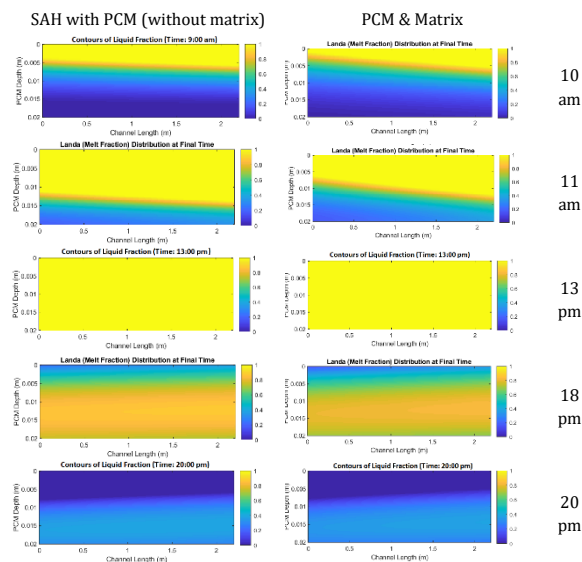
با این حال، در حوالی ساعت ۱۰ صبح مشاهده شد که دمای خروجی سامانه‌ی دارای ماده تغییر فازدهنده و فاقد ماتریس به طور ناگهانی از سامانه‌ی دارای ماتریس پیشی گرفت. این پدیده ناشی از تکمیل

انجماد عمدتاً تحت کنترل هدایت حرارتی ماده تغییر فازدهنده ادامه یافت، به گونه‌ای که تفاوت عملکرد دو سامانه در این فاز تقریباً ناچیز بود.

به طور کلی، حضور ماتریس متخلخل گرچه سرعت پیشروی ذوب را کمتر کرد، اما با پراکندگی تدریجی انرژی و افزایش سهم انتقال حرارت به جریان هوا، پاسخ حرارتی سامانه پایدارتر و یکنواخت‌تر شد و نوسانات دمای خروجی در طول روز کاهش یافت.



شکل ۶ تغییرات نسبت ذوب ماده تغییر فازدهنده در دو پیکربندی هواگرم‌کن در طول روز کاری برای $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ و $G = 0.5$
Fig. 6 Variation of PCM melting fraction in two solar air heater configurations over the operational day for $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ and $G = 0.5$



شکل ۷ کانتورهای نسبت ذوب ماده تغییر فازدهنده در ساعات مشخص از روز برای پیکربندی‌های دارای ماتریس و فاقد ماتریس
Fig. 7 Contours of PCM melting fraction at selected hours of the day for configurations with and without porous matrix

به منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر حضور ماتریس متخلخل بر عملکرد ترمودینامیکی سامانه، بازده تجمعی حرارتی و آگرژی هواگرم‌کن مجهز به ماده تغییر فازدهنده و بازچرخش جریان، در دو حالت با و بدون ماتریس متخلخل، در دبی جرمی 0.025 kg/s بر ثانیه و ضریب بازچرخش 0.5 ، به صورت هم‌زمان مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر این شاخص‌ها در جدول ۷ ارائه شد.

نتایج نشان داد که افزودن ماتریس متخلخل نسبت به سامانه فاقد ماتریس، کاهش جزئی بازده تجمعی حرارتی را به دنبال داشت، که عمدتاً ناشی از انتقال تدریجی‌تر انرژی و تأخیر در تکمیل فرآیند ذوب بود. از منظر بازده تجمعی آگرژی، این شاخص در سامانه دارای ماتریس متخلخل حدود 1.08% درصد کمتر از سامانه فاقد ماتریس اندازه‌گیری شد، که ناشی از عبور جریان هوا از ساختار متخلخل و افزایش افت فشار و اتلافات آگرژیکی است.

با این حال، کاهش محدود بازده حرارتی و آگرژی با بهبود پایداری حرارتی و یکنواختی دمای خروجی همراه شد. این هم‌زمانی نشان می‌دهد که افزایش ثبات عملکرد سامانه با کاهش محدود کارایی ترمودینامیکی توأم است و عملکرد کلی سامانه را در شرایط بهره‌برداری مختلف قابل قبول نگه می‌دارد.

به منظور تکمیل تحلیل حرارتی و تبیین مکانیسم‌های درونی انتقال انرژی، کانتورهای نسبت ذوب ماده تغییر فازدهنده در ساعات مختلف روز ارائه شدند. این کانتورها امکان بررسی فضایی نحوه پیشروی جبهه ذوب و انجماد را در پیکربندی‌های دارای ماتریس و فاقد ماتریس فراهم کردند.

مطابق شکل ۷ در هر دو پیکربندی، ذوب ابتدا از لایه‌های مجاور سطح جاذب آغاز شد. با حرکت جریان هوا در طول کانال و افزایش تدریجی دمای آن، اختلاف دمای مؤثر بین هوا و صفحه جاذب کاهش یافت و در نتیجه نرخ انتقال انرژی به جریان هوا افت کرد. در این شرایط، سهم بیشتری از انرژی مستقیماً به ماده تغییر فازدهنده اختصاص یافت که منجر به توسعه فرآیند ذوب در امتداد کانال و افزایش ضخامت لایه مذاب شد؛ این ناحیه در کانتورهای ارائه شده با رنگ زرد مشخص است.

در سامانه فاقد ماتریس، انتقال مستقیم‌تر انرژی سبب شکل‌گیری سریع‌تر جبهه ذوب در لایه‌های بالایی و نفوذ مؤثرتر آن به عمق ماده شد. در مقابل، با حضور ماتریس متخلخل در بالای صفحه جاذب، بخش بیشتری از انرژی ورودی به واسطه تقویت جابه‌جایی به جریان هوا منتقل گشت. از این رو، پیشروی جبهه ذوب در طول کانال با سرعت کمتر و الگوی غیر یکنواخت‌تری همراه بود و افزایش ضخامت لایه ذوب شده با شیب بیشتری در امتداد کانال رخ داد. در حالی که در سامانه بدون ماتریس، به دلیل انتقال مستقیم‌تر انرژی به ماده تغییر فازدهنده، جبهه ذوب توزیع یکنواخت‌تری در طول کانال نشان داد.

در فاز انجماد، که طی آن انرژی حرارتی به تدریج از ماده تغییر فازدهنده به جریان هوا آزاد شد، الگوی انتقال حرارت معکوس گردید. در این شرایط، با حرکت هوا در طول کانال و کاهش گرادیان دمایی بین هوا و ماده تغییر فازدهنده، انجماد ابتدا در نواحی نزدیک به ورودی کانال آغاز شد و ضخامت لایه منجمد با حرکت به سمت خروجی کاهش یافت. در این مرحله، اختلاف عملکرد بین پیکربندی‌های دارای ماتریس و فاقد ماتریس کمتر شد و فرآیند

سامانه در شرایط تابش بالا برجسته تر بوده و با کاهش ورودی انرژی خورشیدی، نقش آن تضعیف می شود.

مطابق داده های جدول ۷، با افزایش دبی جرمی از ۰/۰۱ به ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه، بازده حرارتی تجمعی از حدود ۴۸/۰۲٪ به ۶۵/۸۸٪ افزایش یافت. این افزایش ناشی از تقویت نرخ انتقال حرارت جابه جایی و ظرفیت گرمایی بالاتر جریان هوا بود که امکان برداشت مؤثرتر انرژی حرارتی ذخیره شده در سامانه را فراهم می کرد. در مقابل، بازده انرژی تجمعی با کاهش دبی جرمی افزایش قابل توجهی نشان داد؛ به گونه ای که مقدار آن از ۱/۸۲٪ در دبی ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه به ۳/۵۸٪ در دبی ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه رسید. این رفتار بیانگر آن است که دبی های پایین تر، با افزایش دمای خروجی هوا و اختلاف دمای مؤثر با محیط مرجع، کیفیت انرژی منتقل شده و قابلیت انجام کار را بهبود می بخشد، حتی اگر مقدار کل انرژی مفید کمتر باشد.

بنابراین، انتخاب دبی جرمی بهینه، که بتواند تعادلی مناسب بین برداشت حداکثری انرژی حرارتی و حفظ کیفیت انرژی خروجی ایجاد کند، اهمیت زیادی دارد. بر اساس نتایج تحلیل شده، محدوده تقریبی دبی بهینه برای سامانه مورد بررسی در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲ کیلوگرم بر ثانیه است.

جدول ۷ بازده حرارتی و بازده انرژی تجمعی سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده و ماتریس متخلخل در دبی های جرمی مختلف

Table 8 Cumulative thermal and exergy efficiency of the system equipped with PCM and porous matrix at different mass flow rates

air mass flow rate (kg/s)	$\eta_{th,cum}$	$\eta_{ex,cum}$
0.01	48.02	3.58
0.015	56.1	3.03
0.025	65.88	1.82

به طور کلی، نتایج نشان داد که شرایط بهینه از نظر بازده حرارتی و انرژی یکسان نیست؛ دبی های بالاتر برای بیشینه سازی برداشت انرژی حرارتی مناسب تر و دبی های پایین تر برای ارتقای کیفیت انرژی و افزایش بازده انرژی مؤثرند. این یافته اهمیت انجام تحلیل هم زمان انرژی و انرژی و ضرورت تعیین دبی جرمی بهینه را در طراحی و بهینه سازی هواگرم کن های خورشیدی، به ویژه برای کاربردهایی با اولویت کیفیت انرژی خروجی، برجسته می سازد.

۴- نتیجه گیری

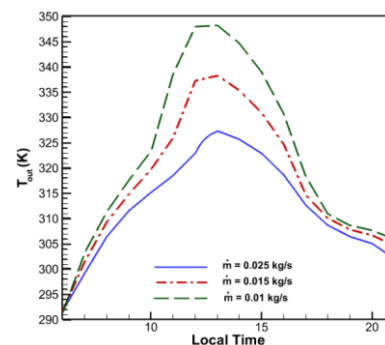
در این مقاله عملکرد سه پیکربندی، شامل هواگرم کن ساده با بازچرخش جریان (حالت مرجع)، سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده بدون ماتریس و با بازچرخش و سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده همراه با ماتریس متخلخل و بازچرخش خارجی جریان هوا، به صورت گذرا و عددی بررسی شد. نتایج نشان داد حضور ماده تغییر فازدهنده باعث ذخیره و آزادسازی تدریجی انرژی حرارتی شده و دمای هوای خروجی در ساعات کم تابش و شب،

جدول ۷ بازده حرارتی تجمعی و انرژی تجمعی هواگرم کن مجهز به ماده تغییر فازدهنده در دو حالت با و بدون ماتریس متخلخل

Table 8 Cumulative thermal and exergy efficiency of the solar air heater equipped with PCM in two cases: with and without porous matrix

	PCM (without Matrix)	PCM + Matrix
$\eta_{th,cum}$	66.36	65.88
$\eta_{ex,cum}$	2.90	1.82

پس از تحلیل رفتار حرارتی سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده و ماتریس متخلخل و مقایسه آن با سایر پیکربندی ها، به منظور ارزیابی اثر دبی جرمی جریان هوا، تغییرات دمای هوای خروجی این سامانه جدید در سه دبی جرمی ۰/۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه در طول ساعات کاری مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۸). نتایج نشان داد که با افزایش دبی جرمی، دمای هوای خروجی در اغلب ساعات کاهش یافت، به گونه ای که بیشینه دمای خروجی در کمترین دبی جرمی و کمترین مقدار آن در بیشترین دبی جرمی حاصل شد.



شکل ۸ تغییرات دمای هوای خروجی سامانه مجهز به ماده تغییر فازدهنده و ماتریس متخلخل برای سه دبی جرمی مختلف در طول روز کاری

Fig. 8 Variation of outlet air temperature in the system equipped with PCM and porous matrix for three different mass flow rates over the operational day

در ساعات اوج تابش خورشیدی، اختلاف دمای خروجی بین کمترین و بیشترین دبی جرمی به حدود ۲۱ کلوین رسیده که نقش کلیدی زمان حضور جریان هوا در کانال هواگرم کن را در کنترل رفتار حرارتی سامانه برجسته می سازد. در دبی های بالاتر، کاهش زمان حضور جریان هوا موجب محدود شدن برداشت حرارت و در نتیجه کاهش دمای خروجی شد، در حالی که در دبی های پایین تر، افزایش زمان تماس جریان هوا با سطوح حرارتی سامانه منجر به جذب انرژی بیشتر گردید.

با کاهش شدت تابش خورشیدی در ساعات پایانی روز، اختلاف دمای خروجی بین دبی های مختلف کاهش یافت، به گونه ای که این اختلاف در حوالی زمان قطع تابش به کمتر از ۴ کلوین محدود شد. این رفتار نشان می دهد که اثر دبی جرمی بر پاسخ حرارتی

حدود ۴/۵ تا ۶ درجه سانتی‌گراد بالاتر از سامانه مرجع باقی می‌ماند، که بیانگر توانایی بالای ماده تغییر فزاینده در حفظ پایداری حرارتی است.

افزودن ماتریس متخلخل با افزایش اغتشاش جریان و تقویت انتقال حرارت جابه‌جایی، پیشروی جبهه ذوب را تدریجی‌تر کرده و شیب تغییرات دمای خروجی را یکنواخت‌تر ساخت. هرچند این تغییرات با کاهش محدود بازده حرارتی و کاهش اندک بازده انرژی (حدود ۱/۰۸٪) به دلیل افزایش افت فشار و اتلافات غیرقابل‌برگشت همراه بود، اما پاسخ حرارتی سامانه پایدارتر و یکنواخت‌تر شد.

تحلیل اثر دبی جرمی نشان داد که شرایط بهینه از نظر بازده حرارتی و بازده انرژی یکسان نیست؛ دبی‌های بالاتر برداشت انرژی حرارتی (کمیت انرژی) را افزایش می‌دهند، در حالی که دبی‌های پایین‌تر کیفیت انرژی خروجی را بهبود می‌بخشند. منظور از کیفیت انرژی در اینجا همان انرژی است که بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، بیانگر پتانسیل انرژی برای انجام کار مفید می‌باشد. در دبی‌های پایین‌تر، هوای خروجی با دمای بالاتر، اختلاف دمای بیشتری با محیط داشته و بنابراین قابلیت انجام کار یا انتقال گرما به محیط‌های با دمای بالاتر را داراست. این همان مفهوم بهبود کیفیت انرژی است که در مقابل افزایش کمیت انرژی (بازده حرارتی بالاتر) در دبی‌های زیاد قرار می‌گیرد. محدوده تقریبی دبی بهینه برای سامانه مورد مطالعه بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲ کیلوگرم بر ثانیه است که تعادلی میان برداشت حداکثری انرژی و حفظ کیفیت انرژی خروجی فراهم می‌کند.

در مجموع، ترکیب ماده تغییر فزاینده و ماتریس متخلخل، با وجود افزایش افت فشار، عملکرد حرارتی یکنواخت و پایدار فراهم کرده و مزایای عملی قابل توجهی برای کاربردهای واقعی سامانه‌های خورشیدی، به‌ویژه گلخانه‌ها، ساختمان‌های کم‌مصرف انرژی و سیستم‌های تهویه خورشیدی ارائه می‌دهد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: این مقاله مستخرج از رساله دکتری نویسنده اول، فاطمه کرمی است.

فهرست علائم

A	سطح (m^2)
A_{co}	مساحت هواگرم‌کن (m^2)
A_f	سطح مقطع کانال (m^2)
c_p	ظرفیت گرمای ویژه ($J/kg\cdot K$)
D_h	قطر هیدرولیکی کانال (m)
d	عمق کانال (m)
d_w	قطر سیم ماتریس (mm)
\dot{E}_{x_u}	نرخ انرژی مفید (W)

f	ضریب اصطکاک در کانال صاف
f_m	ضریب اصطکاک در کانال پرشده
G	ضریب بازچرخش جریان
G_0	سرعت جرمی ($kg/m^2\cdot s$)
H	ارتفاع محفظه ماده تغییر فزاینده
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2\cdot K$)
h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشعی ($W/m^2\cdot K$)
h_w	ضریب انتقال حرارت ناشی از باد ($W/m^2\cdot K$)
I	شدت تابش خورشیدی (W/m^2)
J_H	ضریب کولبرن
k	ضریب هدایت حرارتی ($W/m\cdot K$)
h_{if}	گرمای نهان ذوب یا انجماد (KJ/kg)
L	طول هواگرم‌کن (m)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
n	تعداد لایه‌ها
p_t	گام ماتریس (mm)
P	تخلخل ماتریس
P_{fan}	توان فن (W)
P_{flow}	توان پمپاژ هوا (W)
$\Delta P_{s,d}$	افت فشار در کانال صاف (Pa)
$\Delta P_{p,d}$	افت فشار در کانال پرشده (Pa)
Q_u	حرارت مفید جذب‌شده (W)
r_h	شعاع هیدرولیکی (m)
T	دما (K)
T_s	دمای آسمان (K)
U_b	ضریب اتلاف حرارت از کف ($W/m^2\cdot K$)
V	سرعت باد در محیط (m/s)
v	سرعت متوسط جریان هوا در کانال (m/s)
w	عرض هواگرم‌کن (m)
y	محیط تر شده (m)
Subscript	اندیس‌ها
2	مربوط به کانال ۲
3	مربوط به کانال ۳
a	محیط
b	صفحه پشتی
c	جابجایی
f	جریان هوا
$f2$	جریان هوا در کانال ۲
$f3$	جریان هوا در کانال ۳
gu	پوشش شیشه‌ای بالایی
gl	پوشش شیشه‌ای پایینی
lp	صفحه پایینی محفظه ماده تغییر فزاینده
m	ماتریس
PCM	ماده تغییر فزاینده
p	صفحه جاذب
r	تشعشعی
Acronyms	کلمات اختصاری
Pr	عدد پراتل
Re	عدد رینولدز
St_m	عدد استانتون اصلاح شده
Nu	عدد ناسلت
Greek letters	حروف یونانی
α	ضریب جذب
ε	ضریب گسیلندگی
$\eta_{th,cum}$	بازده حرارتی تجمعی
$\eta_{ex,cum}$	بازده انرژی تجمعی

$$h_{r,lp-b}(T_{lp} - T_b) + h_{c,lp-f3}(T_{lp} - T_{f3}) + k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = 0 \quad (A.5)$$

• صفحه پشتی

$$h_{r,b-lp}(T_b - T_{lp}) + h_{c,b-f3}(T_b - T_{f3}) + U_b(T_b - T_a) = 0 \quad (A.6)$$

پیوست B- روابط مربوط به کانال ساده هواگرم کن

• عدد ناسلت در جریان آرام ($Re < 2300$)

$$Nu = 5.4 + \frac{0.0019[Re.Pr(\frac{D_h}{L})]^{1.71}}{1 + 0.00563[Re.Pr(\frac{D_h}{L})]^{1.17}} \quad (B.1)$$

• عدد ناسلت در جریان گذار ($2300 < Re < 6000$)

$$Nu = 0.116 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{\frac{1}{3}} \left(1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (B.2)$$

• عدد ناسلت در جریان آشفته ($Re > 6000$)

$$Nu = 0.118 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (B.3)$$

• قطر هیدرولیکی کانال

$$D_h = \frac{4A_f}{y} = \frac{4wd}{2(w+d)} = \frac{2wd}{w+d} \quad (B.4)$$

• روابط ضریب اصطکاک

$$f = \frac{16}{Re} \quad \text{for } Re < 2300 \quad (B.5)$$

$$f = 0.0791 Re^{-0.25} \quad \text{for } Re > 2300 \quad (B.6)$$

performance using parallel porous wire mesh: energy, exergy, and enviro-economic analyses,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 48, p. 102385, 2024, DOI:10.1016/j.tsep.2024.102385

[7] M. Palacio, C. Ramírez, M. Carmona, and C. Cortés, “Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater,” *Sol. Energy*, vol. 247, pp. 385–396, 2022. DOI:10.1016/j.solener.2022.10.046

[8] G. Verma, S. Singh, S. Chander, and P. Dhiman, “Numerical investigation on transient thermal performance predictions of phase change material embedded solar air heater,” *J. Energy Storage*, vol. 47, p. 103619, 2022. DOI:10.1016/j.est.2021.103619

[9] A. K. Singh, N. Agarwal, and A. Saxena, “Effect of extended geometry filled with and without phase change material on the thermal performance of solar air heater,” *J. Energy Storage*, vol. 39, p. 102627, 2021. DOI:10.1016/j.est.2021.102627

[10] P. GaneshKumar et al., “Exploring the thermal performance of a solar air heater with a V-corrugated and shot-blasted absorber plate comprising nano-enhanced phase change materials,” *J. Energy Storage*, vol. 77, p. 109955, 2024. DOI:10.1016/j.est.2023.109955

[11] S. K. Chaurasiya and S. Singh, “High power and energy density of a wavy PCM unit embedded in a solar air heater utilizing fractional porous media,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 236, p. 121843, 2024. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121843

[12] S. L. Sharma and A. Debbarma, “Advancement in solar air heater with integrated PCM-based thermal

ضریب ذوب شدگی	λ
ویسکوزیته هوا ($N \cdot s/m^2$)	μ
ویسکوزیته هوا در دمای دیواره ($N \cdot s/m^2$)	μ_w
چگالی (kg/m^3)	ρ
ثابت استفان-بولتزمن	σ
ضریب عبوردهی	τ
راندمان آگرزوی تابش خورشید	ψ

پیوست A- معادلات بالانس انرژی اجزای هواگرم کن

• پوشش شیشه‌ای بالا:

$$h_w(T_{gu} - T_a) + h_{r,gu-s}(T_{gu} - T_s) + h_{r,gu-gl}(T_{gu} - T_{gl}) = I\alpha_{gu} \quad (A.1)$$

• پوشش شیشه‌ای پایین:

$$h_{r,gl-gu}(T_{gl} - T_{gu}) + h_{r,gl-m}(T_{gl} - T_m) + h_{c,gl-f2}(T_{gl} - T_{f2}) = I\tau_{gu}\alpha_{gl} \quad (A.2)$$

• ماتریس

$$h_{r,m-gl}(T_m - T_{gl}) + h_{r,m-p}(T_m - T_p) + h_{c,m-f2}(T_m - T_{f2}) = I\tau_{gu}\tau_{gl}\alpha_m \quad (A.3)$$

• صفحه جاذب

$$h_{r,p-m}(T_p - T_m) + h_{c,p-f2}(T_p - T_{f2}) - k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = I\tau_{gu}\tau_{gl}\alpha_p \quad (A.4)$$

• صفحه پایینی

منابع

[1] P. Verma, A. Saxena, and L. Varshney, “A critical review on thermo-hydraulic performance of wire screen matrix packed solar air heaters,” *Distrib. Gener. Altern. Energy J.*, vol. 35, no. 2, pp. 75–110, 2020. DOI:10.13052/dgaej2156-3306.3521

[2] A. Ahmadkhani, G. Sadeghi, and H. Safarzadeh, “An in depth evaluation of matrix, external upstream and downstream recycles on a double pass flat plate solar air heater efficacy,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 21, p. 100789, 2021. DOI:10.1016/j.tsep.2020.100789

[3] V. K. Chouksey, A. Singh Yadav, S. Raha, V. Shrivastava, and S. P. Shrivastava, “A theoretical parametric analysis to optimize the bed depth of packed bed solar air collector,” *Int. J. Green Energy*, vol. 19, no. 7, pp. 775–785, 2022. DOI:10.1080/15435075.2021.1961263

[4] A. F. Ismail, A. S. Abd Hamid, A. Ibrahim, H. Jarimi, and K. Sopian, “Performance analysis of a double pass solar air thermal collector with porous media using lava rock,” *Energies*, vol. 15, no. 3, p. 905, 2022. DOI:10.3390/en15030905

[5] H. Farzan and E. H. Zaim, “Thermal analysis of a new double-pass solar air heater using perforated absorber and porous materials: An experimental study,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 38, p. 101680, 2023. DOI:10.1016/j.tsep.2023.101680

[6] R. Fattoum, A. Hidouri, M. El Hadi Attia, M. Arıcı, and M. Ammar Abbassi, “Optimization of solar air heaters

energy storage system," *Int. J. Green Energy*, vol. 21, no. 14, pp. 3330–3366, 2024.

DOI:10.1080/15435075.2024.2360475

[13] Rubitherm Technologies GmbH, "Phase Change Material," Rubitherm, [Online]. Available:

<https://www.rubitherm.com/en/pcm.html>.

[Accessed: Sep. 2025]

[14] W. H. McAdams, *Heat Transmission*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book Co., 1954.

[15] K. Sopian, M. A. Alghoul, E. M. Alfegi, M. Y. Sulaiman, and E. A. Musa, "Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous-nonporous media," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 640–645, Mar. 2009,

DOI:10.1016/j.renene.2008.05.027

[16] N. S. Thakur, J. S. Saini, and S. C. Solanki, "Heat transfer and friction factor correlations for packed bed solar air heater for a low porosity system," *Sol. Energy*, vol. 74, no. 4, pp. 319–329, Apr. 2003,

DOI:10.1016/S0038-092X(03)00153-1

[17] R. Moradi, A. Kianifar, and S. Wongwises, "Optimization of a solar air heater with phase change materials: Experimental and numerical study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 89, pp. 41–49, 2017.

DOI:10.1016/j.expthermflusci.2017.07.011

[18] S. Singh and P. Dhiman, "Thermal and thermohydraulic performance evaluation of a novel type double pass packed bed solar air heater under external recycle using an analytical and RSM (response surface methodology) combined approach," *Energy*, vol. 72, pp. 344–359, 2014.

DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.044

[19] M. Heydar and M. Sabzpooshani, "Performance Evaluation of New Combination External Recycle Flow and Arc-shaped Wire as Artificial Roughness of Solar Air Heater," *Energy Engineering and Management*, Vol. 13, no. 2, pp. 112–127, 2023.

DOI: 10.22052/jeem.2023.113708.

[20] P. Dhiman, N. S. Thakur, and S. R. Chauhan, "Thermal and thermohydraulic performance of counter and parallel flow packed bed solar air heaters," *Renew. Energy*, vol. 46, pp. 259–268, Oct. 2012,

DOI:10.1016/j.renene.2012.03.032