



Experimental Study of Effect of Storage Phase Change Materials (PCM) on the Function of a Passive Solar Ventilator

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Barghi Jahromi M.S.¹ MSc,

Kalantar V.*¹ PhD,

Abdolrezaie M.² MSc

How to cite this article

Barghi Jahromi M.S, Kalantar V, Abdolrezaie M. Experimental Study of Effect of Storage Phase Change Materials (PCM) on the Function of a Passive Solar Ventilator. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1709-1717.

ABSTRACT

In the current study, natural solar ventilation has been investigated aiming at reducing the consumption of fossil and thus, reducing greenhouse gas emissions in a hot and dry climate in which the behavior of various fluid variables (temperature, velocity, and flow rate) is considered in different conditions. Since solar radiation is not uniform throughout the day, passive solar ventilation is unstable. In this regard, the natural displacement flow in a solar ventilator with copper thermal absorber, double-glazed glass compartment to prevent thermal energy loss, as well as phase change materials for the storage of thermal energy has been investigated, experimentally. In the case of no phase change material, due to the creation of a suitable temperature difference, the panel has made the chimney effect possible for natural ventilation in some hours of the day, but in the early hours of the night, the temperature of the panel will be the same as the ambient temperature, and the chimney effect will not be available for proper ventilation. In a panel equipped with phase change materials, the system has acceptably been able to play an important role in reducing the temperature drop in the hours of the day with no solar radiation leading to a reliable air flow rate. In fact, the main purpose of using phase change materials in passive solar ventilation is the same effect, the use of excess energy in cases of energy shortages.

Keywords Solar Ventilator; Environmental Conditions; Phase Change Material; Thermal Energy Storage

CITATION LINKS

[1] Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts [2] Phase change materials for smart textiles-an overview [3] Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings [4] Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings [5] Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room [6] PCM thermal storage in buildings: A state of art [7] Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content [8] Optimization of a phase change material wallboard for building use [9] Internal surfaces including phase change materials for passive optimal shift of solar heat gain [10] Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management [11] Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r [12] Solar chimneys: Simulation and experiment [13] Solar chimney for enhanced stack ventilation [14] A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery [15] A numerical investigation of combined solar chimney and water wall for building ventilation and thermal comfort [16] A new design of passive air condition integrated with solar chimney for hot arid region of Egypt [17] Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney [18] An experimental investigation of an inclined passive walls solar chimney for natural ventilation [19] Thermal driven natural convective flows inside the solar chimney flush-mounted with discrete heating sources: Reversal and cooperative flow dynamics [20] Effect of thermal storage on the performance of a deep bed drying system [21] Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM [22] The center of organic matter, mineral, and chemical of iran Sodium sulfate production

¹Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

²Department of Engineering, Yazd Branch, Yazd University, Yazd, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
Postal Code: 89195741.

Phone: +98 (35) 31232492

Fax: +98 (35) 38210699

vkalantar@yazd.ac.ir

Article History

Received: November 25, 2019

Accepted: April 26, 2020

ePublished: July 20, 2020

بررسی تجربی اثر مواد ذخیره‌کننده تغییر فازدهنده بر عملکرد یک تهویه‌ساز خورشیدی غیرفعال

محمد صالح برقی جهرمی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

ولی کلانتر PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مهران عبدالرضایی MSc

گروه فنی و مهندسی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، تهویه طبیعی خورشیدی با هدف کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش گازهای گلخانه‌ای، در شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار متغیرهای مختلف سیال شامل (دما، سرعت و دبی) در حالات گوناگون اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار گرفته است. از آنجایی که تشعشع خورشیدی طی روز ثابت نیست تهویه خورشیدی غیرفعال ناپایا است. در این راستا جریان جابه‌جایی طبیعی در تهویه‌ساز خورشیدی دارای جاذب حرارتی مسی، محفظه شیشه‌ای دوجداره به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی حرارتی و همچنین مواد تغییر فازدهنده برای ذخیره انرژی حرارتی مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. تهویه‌ساز در وضعیت بدون مواد تغییر فازدهنده با توجه به ایجاد اختلاف دمای مناسب توانسته است پدیده دودکشی برای تهویه طبیعی را در بخشی از ساعات روز امکان‌پذیر کند، اما در ساعات اولیه شب دمای تهویه‌ساز با دمای محیط یکسان شده و پدیده دودکشی به منظور تهویه مناسب در دسترس نخواهد بود. در تهویه‌ساز مجهز به مواد تغییر فازدهنده سیستم توانسته است به‌طور قابل قبولی در کاهش افت دمایی در ساعاتی از شبانه‌روز که تشعشع خورشیدی وجود ندارد نقش مهمی را ایفا کند که به دنبال آن پایابودن نرخ جریان هوا را در بر خواهد داشت. در حقیقت هدف اصلی استفاده از مواد تغییر فازدهنده در تهویه خورشیدی غیرفعال همین اثر، یعنی استفاده از انرژی اضافی در موارد فقدان انرژی است.

کلیدواژه‌ها: تهویه‌ساز خورشیدی، شرایط محیطی، مواد تغییر فازدهنده، ذخیره‌کننده گرما

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

نویسنده مسئول: vkalantar@yazd.ac.ir

مقدمه

براساس مطالعات انجام‌شده مصرف انرژی در جهان هر ۲۰ سال دو برابر می‌شود. این مساله اهمیت استفاده از منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست را بیش از پیش روشن می‌کند. در ایران به دلیل زیادبودن روزهای آفتابی، رطوبت کم و پایین‌بودن ارتفاع بسیاری از مناطق، انرژی خورشیدی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای باشد [1]. حرکت‌دادن هوا از میان فضاها به منظور تأمین هوای مورد نیاز ساختمان و آسایش حرارتی به‌عنوان تهویه ساختمان شناخته می‌شود. ون تیلیشن (Ventilation) از کلمه ون توس (Ventus) آمده که مفهوم حرکت و جابه‌جایی است. تهویه در کنترل محیطی خانه به سه منظور تأمین هوای تازه جهت مصرف ساکنین ساختمان (تهویه

بهداشتی)، افزایش از دست‌دادن حرارت و تبخیر در بدن (تهویه آسایشی) و خشک‌کردن داخل ساختمان به‌وسیله تعویض هوای گرم داخل با هوای خنک خارج (تهویه ساختمانی) انجام می‌پذیرد. تهویه ممکن است طبیعی یا اجباری باشد. در تهویه اجباری از ابزار مکانیکی مانند فن‌ها برای به جریان‌درآوردن هوا در ساختمان استفاده می‌شود. از طرف دیگر، در تهویه طبیعی از نیروهای طبیعی مانند اختلاف چگالی ناشی از اختلاف حرارت (شناوری یا پدیده دودکشی (Stack Effect) یا باد برای القای جریان هوا استفاده می‌شود.

مواد تغییر فازدهنده (Phase Change Materials; PCM) یکی از ابزارهای کارآمد برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی هستند. عملکرد آنها به این صورت است که با افزایش دما، تغییر فاز داده و انرژی حرارتی را در خود ذخیره می‌کنند و با کاهش دما این انرژی را آزاد می‌سازند. انرژی ذخیره‌شده از طریق گرمای نهان که با تغییر فاز ماده همراه است، به دلیل چگالی بالای ذخیره انرژی گرمایی از اهمیت زیادی برخوردار است [2]. اساس استفاده از مواد تغییر فازدهنده برای تهویه آزاد ساختمان‌ها دو مرحله دارد: ابتدا به هنگام شب که دمای محیط از دمای اتاق پایین‌تر است، جریان هوای خنک محیط از واحد ذخیره‌ساز انرژی عبور کرده و حرارت ماده تغییر فازدهنده در حالت مایع را گرفته و این ماده شروع به انجماد در دمای ثابت می‌کند. سپس هنگامی که در طول روز، دمای اتاق از حد مطلوب بالاتر می‌رود، هوای خنک ذخیره‌شده در ماده تغییر فازدهنده تخلیه می‌شود. به این صورت که هوای گرم از واحد ذخیره‌ساز انرژی عبور کرده، ماده تغییر فازدهنده این گرما را دریافت می‌کند و در یک دمای ثابت ذوب شده و در نهایت هوای خنک‌شده مطلوب وارد اتاق می‌شود. بهره‌وری سیستم تهویه آزاد تا حد زیادی به شرایط آب‌وهوایی محیط بستگی دارد. خواص ماده تغییر فازدهنده به‌ویژه دمای ذوب آن بسیار مهم بوده و این دما باید در محدوده تغییرات دمای روزانه باشد. جریان هوا اهمیت زیادی برای عملکرد موفق سیستم تهویه آزاد دارد و در صورتی که این جریان مناسب باشد، آنگاه انتقال حرارت موفقیت‌آمیز خواهد بود.

یکی از اولین مطالعات در زمینه سیستم تهویه آزاد توسط تورنپینی و همکاران [3] انجام شد، که هدف آن کاهش بار تهویه مطبوع در ساختمان‌ها بود. نمک هیدراته $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ با دمای ذوب ۳۱ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان ماده تغییر فازدهنده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه اولیه این سیستم در یک دفتر معمولی نصب و آزمایش شد، که نتایج نشان می‌دهد طی ۸ ساعت کار اداری ۲۷۰ وات ساعت انرژی حرارتی ذخیره شد. اگر این سیستم آزمایشی جایگزین واحدهای سرمایش معمولی در ۲۰۰۰ اداره در انگلستان شود، تولید کربن‌دی‌اکسید به میزان ۴۳۰ تن در سال کاهش می‌یابد. /نگ و همکاران [4]، در تحقیق خود که در شرایط زمستانی شهر پکن انجام شد به این نتیجه رسیدند که دمای ذوب مناسب ماده تغییر فازدهنده باید کمی بالاتر از متوسط دمای هوای اتاقی

این دما باید به دمای مطلوب مورد نظر برای اتاق نزدیک باشد. *افونسو و لیویو*^[12]، دودکش خورشیدی با جداره شیشه‌ای به جای دودکش خورشیدی مرسوم به کار بردند. آنها با انجام آزمایش و شبیه‌سازی نشان دادند که نرخ تهویه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. *بانسال* و همکاران^[13]، مدل ریاضی جهت بررسی دودکش خورشیدی فراهم آورده و آن را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که دودکش از طریق تشعشع خورشیدی تهویه قابل توجهی را به دست می‌دهد. *گن و ریفات*^[14]، دودکش خورشیدی با جداره شیشه‌ای برای بازیابی حرارتی در ساختمان، که به‌طور طبیعی تهویه می‌شود، به کار برد تا اثر آن را بر بازده بررسی کند. این بررسی به این نتیجه رسید که نصب لوله‌های گرم در مجرا اثر شناوری را کاهش می‌دهد و برای دستیابی به نرخ مورد نیاز جریان هوا، لازم است نیروی باد در آن لحاظ شود. *وگت و لی*^[15] به بررسی عددی دودکش خورشیدی و دیوار آبی برای ۹ ساختمان و آسایش حرارتی پرداختند، همچنین تأثیر پارامترهای اصلی طراحی شامل ضخامت پانل شیشه، عرض شکاف هوایی و ضخامت ستون آب با شبیه‌سازی CFD بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیستم ترکیبی قادر به تهویه شبانه‌روزی با میانگین روزانه ۴/۱ تغییر هوا در ساعت و در عین حال میانگین روزانه دمای اتاق ۴/۸ درجه سانتی‌گراد بالاتر از محیط است. در مطالعه *عبدالله*^[16] طراحی جدیدی از وضعیت هوای غیرفعال با دودکش خورشیدی برای مناطق خشک و گرم بررسی شده است. این مطالعه با هدف بررسی عملکرد حرارتی و کیفیت هوای داخلی دودکش خورشیدی با برج خنک‌کننده غیرفعال است. آزمایش انجام‌شده برای یک خانه آزمایشی و آسایش ساکنان آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمای هوای خروجی از برج بادی ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد است. همچنین میانگین نظرات گرفته‌شده از افراد خانه محاسبه شده و در محدوده پیشنهادی ۵/۵ و ۵/۵- قرار دارد. این نشان می‌دهد که سرنشینان پس از استفاده از سیستم خنک‌کننده منفعل از محیط حرارتی داخلی رضایت دارند و اختلاف دمای بین فضای بیرون و داخل خانه تقریباً ۸ درجه سانتی‌گراد است. *عمران* و همکاران^[17]، یک مدل آزمایشی و عددی از یک دودکش خورشیدی به‌منظور پیش‌بینی عملکرد آن تحت ویژگی‌های هندسی مختلف در شرایط محیطی عراق بررسی کردند. جریان پایدار، دوبعدی و آشفته توسط همرفت طبیعی در داخل یک دودکش خورشیدی بررسی شد. نتایج مدل عددی نشان داد که زاویه بهینه شیب دودکش ۶ درجه برای به‌دست‌آوردن حداکثر میزان تهویه بود. *خانال و لی*^[18] در مطالعه‌ای از یک مدل دودکش خورشیدی غیرفعال شیب‌دار با شار گرما یکنواخت روی دیواره فعال (جذب) استفاده کرده‌اند. در این طرح دامنه شار گرما ۱۰۰ تا ۵۰۰ وات بر متر مربع و عرض شکاف هوایی ۱/۸ متر و زاویه‌های دیواره منفعل از ۰ تا ۶ درجه بررسی شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که زاویه شیب دیواره غیرفعال هیچ تأثیر معنی‌داری بر توزیع دما در عرض شکاف هوایی و در امتداد ارتفاع

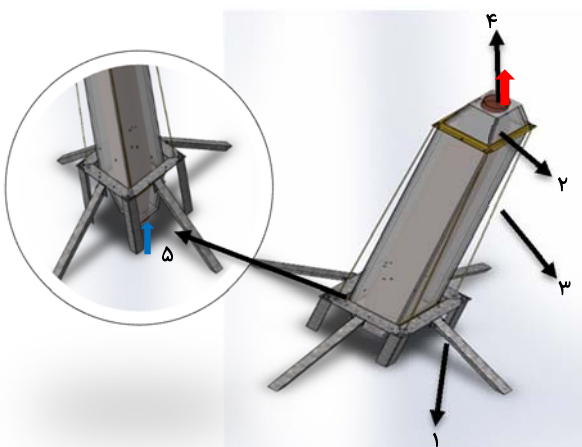
باشد که PCM در آن به کار رفته است. آنها دمای ذوب ایده‌آل را حدود ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر از متوسط دمای هوای اتاق به‌دست آوردند. آنها نقطه ذوب ایده‌آل برای شهر پکن را ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آوردند. *ژیاو و همکاران*^[5]، در تحقیق خود پس از بررسی عملکرد گرمایی صفحات PCM در یک ساختمان، بیان کردند که دمای ذوب بهینه این مواد با متوسط دمای هوای اتاق در روزهای آفتابی زمستان برابر است و این دمای بهینه به ساختمان و اقلیم مورد بررسی وابسته است. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که برای یک نقطه ذوب ایده‌آل باید انرژی آزاد شده و ذخیره‌شده در صفحات حاوی ماده تغییر فازدهنده در یک دوره با هم برابر باشد. *تیگی و بودهی*^[6] در مروری که بر تحقیقات صورت‌گرفته، انجام داده‌اند، عنوان می‌کنند که در مواد تغییر فازدهنده‌ای که دمای ذوب آنها در بازه ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند پتانسیل به‌کارگیری برای آسایش حرارتی را دارا هستند. *بورگوئرو و همکاران*^[7]، به بررسی عملکرد سه نوع مختلف PCM به روش شبیه‌سازی عددی و روش تجربی پرداختند. آنها یک سطح PCM را در شرایط مرزی مشخصی قرار داده و به بررسی تأثیر تغییر هدایت حرارتی بر دمای سطح دیگر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزایش هدایت حرارتی در کوتاه‌مدت به افزایش دمای سطح خارجی و افزایش نرخ شارژ و دشارژ انرژی گرمایی در ماده تغییر فازدهنده، منجر می‌شود. *کوزنیک و همکاران*^[8]، به این نتیجه رسیدند که برای ضخامت‌های کم صفحه حاوی ماده تغییر فازدهنده، تغییرات مقدار انرژی ذخیره‌شده در این صفحات، متناسب با تغییرات ضخامت آن صفحه است. ولی برای ضخامت‌های زیاد، تغییر ضخامت صفحه حاوی PCM تأثیر چندانی در میزان ذخیره انرژی در آن ندارد. *آرنالت و همکاران*^[9]، در تحقیق خود به بررسی تأثیر کاربرد یک لایه PCM در کف اتاقی نمونه در آب‌وهوای شهر کبک کانادا، از جهت تأثیر بر عملکرد سیستم های تهویه مطبوع به‌کاررفته در اتاق و نیز مصرف انرژی گرمایی اتاق پرداختند. آنها نشان دادند که کاربرد یک لایه نازک ماده تغییر فازدهنده در کف، عملکرد بهتری از یک لایه بتن ضخیم در کف دارد. *کورشی و همکاران*^[10]، به بررسی تأثیر ذخیره انرژی گرمایی توسط PCM در ساختمان، بر میزان و نحوه مصرف انرژی الکتریکی در ساختمان‌های مسکونی پرداختند. آنها به این منظور یک اتاق نمونه در محوطه دانشگاه آلکند کشور نیوزلند ساختند. نتایج نشان داد که کاربرد ماده تغییر فازدهنده در اتاق می‌تواند تا حداکثر ۱۵۸ دقیقه در زمان ماکزیمم بار گرمایی اتاق تأخیر زمانی ایجاد کند. با این تأخیر زمانی می‌توان ضمن کاهش مقدار ماکزیمم مصرف انرژی الکتریکی اتاق و یکنواخت‌ترکردن مصرف، مقدار مصرف انرژی الکتریکی را نیز کاهش داد. *هیم و کلارک*^[11]، در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار PCM در زمینه کاهش مصرف انرژی، دمای انجماد آن است آنها در تحقیق خود نشان دادند که نقطه انجماد این مواد باید بالا باشد ولی با وجود نیاز به بالابودن نقطه انجماد،

طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $38 \times 38 \times 350$ سانتی متر است که از ورق مسی ساخته شده و بر روی یک سازه به ارتفاع ۱۰ سانتی متر قرار گرفته است.



شکل ۱) تهویه ساز خورشیدی و نقاط مختلف اندازه گیری سرعت و دما

قسمت های مختلف دستگاه مانند چهارپایه فلزی، محفظه تهویه ساز خورشیدی، جداره کلکتور و لوله کشی جهت قراردادن مواد تغییر فاز دهنده انتخاب و با استفاده از نرم افزار سالی دورک طراحی سیستم انجام و نحوه استقرار اجزای آن مشخص و بر همین اساس ساخته شد که جزییات آن مطابق شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲) تصویر شماتیک اجزای سیستم تهویه ساز خورشیدی: ۱- چهارچوب فلزی، ۲- محفظه تهویه ساز خورشیدی، ۳- دیواره کلکتور که لوله های مسی در آن قرار دارد، ۴- خروجی تهویه ساز خورشیدی، ۵- ورودی تهویه ساز خورشیدی

چهارپایه از چهار نبشی آهن ۱۰ در طول ۱۵ سانتی متر استفاده شده است. برای اتصال نبشی ها به سایر اجزای هندسه در انتهای یک سر نبشی قطعه C مانند جوش داده شده و با تعبیه دو سوراخ با فواصل ۴ سانتی متر هر نبشی به دو قسمت مجزای دیگر متصل شده است. قطعه مذکور متشکل از ورق آهنی به ضخامت

دودکش ندارد. از طرف دیگر، سرعت متوسط جریان هوا در طول عرض شکاف هوایی به شدت تحت تأثیر زاویه شیب قرار می گیرد. نتایج تجربی همچنین نشان می دهد که دودکش خورشیدی غیرفعال شیب دار با ارتفاع جاذب 70° متر و عرض شکاف هوایی 10° متر در زاویه شیب ۶ و شار گرمای ورودی 500 W/m^2 بر متر مربع می تواند تهویه کافی را برای یک اتاق 27 m^3 مکعب براساس استانداردهای ASHREA ایجاد کند. رن و همکاران [19]، در پژوهشی به جریان سیال و مکانیزم انتقال گرما در یک دودکش خورشیدی ایجاد شده توسط نیروی شناوری گرمایی در محدوده ای از اعداد رایلی با بررسی های عددی و تجربی پرداختند. نتایج عددی نشان می دهد که جریان معکوس نه تنها دبی حجم را کند می کند بلکه باعث افزایش تسریع جریان برگشتی ارایه شده در دودکش خورشیدی نیز می شود که عدد رایلی اگر بیش از یک مقدار مشخصی افزایش یابد، باعث می شود دودکش خورشیدی نقش تهویه خود را از دست بدهد. به منظور جلوگیری از جریان معکوس و افزایش عملکرد تهویه، یک دودکش خورشیدی با چند منبع مجزا متصل به دیوار، پیشنهاد شده است. توزیع دما در امتداد دیواره گرم شده برای ورودی مختلف گرما در دمای محیط، دما در دیواره گرم شده را به طور خطی افزایش نمی دهد و حتی در نزدیکی خروجی بالا افت می کند.

در این پژوهش سعی شده است سیستمی طراحی شود که هوا را به طور خودکار به گردش درآورد و برای بیان دقیق تأثیرات سیستم در روند تهویه طبیعی محیط در دسترس، دبی های ورودی و خروجی هوا، دما در مراحل و زمان های مختلف بررسی، اندازه گیری و ثبت می شود. نمودارهای مربوطه برای بیان دقیق مساله رسم شده و مساله به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون تحقیقات متنوعی در زمینه دودکش خورشیدی غیرنیروگاهی صورت پذیرفته است که به بررسی دودکش و پارامترهای موثر آن پرداخته است. نوآوری در این تحقیق تعبیه مواد تغییر فاز دهنده در جداره داخلی سیستم تهویه ساز خورشیدی جهت تأمین انرژی مورد نیاز سیستم در شب و کاهش نوسانات دمایی در طی روز و شب است.

مواد و روش ها

یک نمونه تهویه ساز خورشیدی با جریان جابه جایی طبیعی شامل چهارپایه فلزی، محفظه تهویه ساز خورشیدی، جداره کلکتور، لوله کشی های داخلی جهت تعبیه مواد تغییر فاز دهنده، کمربندهای طراحی شده برای اتصالات شیشه ها، ستون های تعبیه شده برای تحمل بار فشاری کمتر روی محفظه شیشه ای، مهارکش ها و سامانه اندازه گیری و کنترل دما و رطوبت است. در ادامه به تشریح قسمت های مهم دستگاه تهویه ساز خورشیدی و نحوه ساخت و اندازه گیری های مربوطه پرداخته می شود.

شرح طراحی و ساخت دستگاه تهویه ساز خورشیدی و متعلقات آن
تهویه ساز خورشیدی که در شکل ۱ نشان داده شده است، دارای

خروجی تهویه‌ساز، دمای ورودی تهویه‌ساز، دمای محیط، دمای ورودی و خروجی تهویه‌ساز و دما بدنه کلکتور از ترموکوپل‌های نوع K با محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد که از قبل کالیبره شده‌اند و برای ثبت و ذخیره آنها از دستگاه دیتالاگر ۱۶ کاناله (Hioki) استفاده شد. برای اندازه‌گیری سرعت هوا از دستگاه Testo ۴۵۴ توسط سنسور و پراب تلسکوپی با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه و محدوده اندازه‌گیری ۰/۴ تا ۶۰ متر بر ثانیه استفاده شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای کمیت‌هایی چون دبی جرمی یا حجمی باید عدم قطعیت مورد بررسی قرار گیرد که در خصوص دبی جرمی هوا ضمن تکرار آزمایش در چند نوبت عدم قطعیت بررسی شده و خطای تصادفی قابل توجه نیست. هر کدام از این اندازه‌گیری‌ها چندین مرتبه تکرار شده و میانگین داده‌ها در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از دستگاه پیرانومتر مدل ۶ KIPP&ZONEN CMP با دقت ۴ وات بر متر مربع استفاده شد. مشخصات وسایل اندازه‌گیری در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۳) وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده؛ ۱- دیتالاگر، ۲- پیرانومتر، ۳- ۴۵۴ testo

جدول ۱) مشخصات وسایل اندازه‌گیری

نام تجاری	سازنده دستگاه و مدل آن	دقت اندازه‌گیری
دیتالاگر ۱۶ کاناله	Hioki	±۰/۱
پیرانومتر	KIPP&ZONEN	±۴ وات بر متر مربع
سرعت‌سنج	CMP6	۰/۱ متر بر ثانیه
ترموکوپل	Testo 454 K	۰/۳ درجه سانتی‌گراد

معادلات حاکم

جریان‌های ناشی از شناوری هنگامی رخ می‌دهد که گرما به سیال اضافه می‌شود و چگالی سیال با دما تغییر کند. این اختلاف چگالی باعث القای جریان می‌شود که به جابه‌جایی طبیعی

۱۰ میلی‌متر در قالب دوزنقه با قاعده بزرگ، قاعده کوچک و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است. برای محفظه دستگاه از شیشه دوجداره با ضخامت ۴ و فضای ۸ میلی‌متر استفاده شده است. هندسه این قسمت یک مکعب‌مربع در ابعاد داخلی ۳۵×۳۵×۳۰۰ سانتی‌متر و طول محفظه شیشه‌ای لازم جهت هندسه ۳ متر بوده است. چهارچوب نگه‌دارنده محفظه تهویه‌ساز خورشیدی از چهار تسمه ۵ که به‌صورت گونیا و در شکل مربع به هم جوش شده‌اند تشکیل شده است. در وسط هر تسمه ۵ یک تسمه ۲ به‌صورت قائم جوش خورده است که در واقع می‌توان همانند قاب پنجره از آن استفاده نمود. برای ساخت کلکتور از ورق مسی کوئل کوپر به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است که این ورق طی نورد و چرخ به شکل لوله برای ایجاد محفظه مورد نظر در آمده است از لوله‌هایی به ارتفاع ۶۶۰ میلی‌متر که به‌صورت اتصال نر و مادگی به هم متصل می‌شوند در نظر گرفته شده است، همچنین برای استحکام هر چه بیشتر این لوله‌ها در برابر له‌شدگی و انعطاف‌پذیری سعی شده سطح مقطع هر لوله در دو مقطع، چرخ شود که این امر در استحکام شکل لوله‌ای آن تأثیر زیادی خواهد داشت. سطح آنها برای ایجاد جذب حرارت بیشتر به رنگ کدر در آمده که این امر با رنگ پلاستیکی مشکی صورت پذیرفته است، این نوع تغییر رنگ نسبت به رنگ‌های روغنی و شفاف از بازگشت تشعشع و حرارت نیز جلوگیری می‌کند. برای قسمت‌های ورودی و خروجی هندسه کلکتور استوانه‌های مخروطی از جنس مس تعبیه شده که باز هم به شکل اتصال نر و مادگی به ورودی و خروجی محفظه اصلی کلکتور وصل می‌شوند. این دو مخروط با شعاع کوچک‌تر ۱۵۰ میلی‌متر و شعاع بزرگ‌تر ۳۰۰ میلی‌متر هستند که در ارتفاع ۳۶۰ میلی‌متر طراحی شدند. در جداره داخلی کلکتور محفظه‌ای برای تعبیه مواد تغییر فازدهنده در نظر گرفته شده است چرا که این مواد طی تغییر دما تغییر فاز داشته و جاری می‌شوند، بنابراین لازم است که در محفظه‌ای مناسب قرار گیرند. برای این امر از یک شبکه لوله‌ای از جنس مس استفاده شده است که سعی شده این شبکه به‌صورت دایره‌ای طراحی شود تا که در قسمت داخلی کلکتور در مجاورت جداره و در معرض جذب حرارت واقع شود تا بیشترین جذب حرارت و تابش را در بر گیرد. این لوله‌ها در ارتفاع ۳ متر و با اتصالات زانویی و مقطعی از جنس همین لوله به‌صورت شبکه‌ای درآمده که توسط سه بست وارونه به داخل جداره کلکتور تثبیت می‌شوند. مهارکش‌هایی نیز در این طرح به‌کار رفته شده است که برای جلوگیری تغییرات ناشی از نوسانات، تحت اثر باد یا سایر عوامل محیطی تعبیه شده است.

یکی از ویژگی‌های تهویه‌ساز خورشیدی حاضر استفاده از ماده PCM در جداره کلکتور است، جداره کلکتور از جنس مس است بنابراین بیشترین جذب و انتقال گرما را دارد و ماده تغییر فازدهنده در نقطه ذوب خود شروع به تغییر فاز می‌کند.

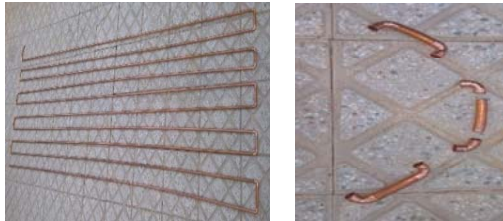
وسایل اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری دمای داخل محفظه تهویه‌ساز خورشیدی، دمای

سه بست وارونه به داخل جداره کلکتور تثبیت می‌شوند. این مراحل در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

جدول (۲) مشخصات مواد تغییر فازدهنده [22]

توضیح	مشخصات PCM
نام تجاری	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
نقطه انجماد (درجه سانتی‌گراد)	۳۰
نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۳۴



شکل (۴) ماده PCM پر شده در لوله‌های مسی شکل

آزمایش‌های مربوطه در یکی از منازل شهر یزد در روزهای ۱۰ و ۱۱ شهریور ماه ۱۳۹۷ انجام گرفت. آزمایشات در شرایط مشابه از لحاظ دمای محیطی و شدت تابش خورشیدی در دو روز پشت سر هم انجام شده است.

بحث و بررسی نتایج

طراحی و ساخت یک تهویه‌ساز خورشیدی مجهز به کلکتور و برای حالت‌های مختلف با ماده تغییر فازدهنده (سدیم سولفات کربنات) و بدون آن، و مقایسه سرعت هوای ورودی، پارامترهای عملکرد این تهویه‌ساز خورشیدی در شرایط آب‌وهوایی شهر یزد بررسی شد. بنابراین نتایج به‌دست‌آمده اثر استفاده از ماده ذخیره‌کننده گرما و جابه‌جایی طبیعی به‌طور مستقل و ترکیب آنها بر فرآیند تهویه‌ساز خورشیدی را نشان می‌دهد.

آزمایش در روز ۱۰ شهریور انجام شده است. انتخاب دهم شهریورماه در حالی است که دمای هوای محیط به ۲۸ درجه سانتی‌گراد رسیده و تشعشع خورشید تقریباً در حد متوسط خود در طول سال است. بنابراین روز انتخاب‌شده از جهتی می‌تواند وضعیتی میانگین برای تهویه در طول روزهای سال باشد. در این روز میزان انرژی تابشی رسیده از خورشید طبق نمودار ۱، نشان می‌دهد که بیشترین میزان شدت تابش در حدود ساعت ۱۴:۴۵ به مقدار ۸۴۴ وات بر متر، این روند از ابتدای صبح تا ساعت ۱۵:۱۰ صعودی است و از این ساعت به بعد سیر نزولی می‌گیرد.

تشعشع خورشیدی می‌تواند توسط مواد ذخیره‌ساز طی روز جذب شده تا بار حرارتی لازم را برای به‌دست‌آوردن شرط مطلوب تحویل دهد. به هر حال در طول شب زمانی که تشعشع خورشیدی از بین می‌رود دمای محیط تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد پایین می‌آید که طی این مدت زمان نمی‌توان بار حرارتی مورد نیاز را به تهویه‌ساز تحویل داد. بنابراین به‌طور طبیعی دمای محفظه کلکتور کاهش خواهد یافت.

معروف است. در جابه‌جایی طبیعی خالص توان جریان ناشی از شناوری به‌وسیله عدد رایلی اندازه گرفته می‌شود.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L^3 \rho}{\mu\alpha} \quad (1)$$

که β ضریب انبساط حرارتی آن به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (2)$$

α نفوذ گرمایی است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (3)$$

اعداد رایلی کمتر از 10^4 نشان‌دهنده جریان طبیعی آرام و اعداد رایلی بین 10^4 و 10^6 نشان‌دهنده ناحیه گذار به جریان آشفتنه است.

برای بسیاری از جریان‌های با جابه‌جایی طبیعی می‌توان با مدل بوزینسک به همگرایی سریع‌تری دست یافت، در این مدل چگالی سیال به‌صورت تابعی از دما بیان شده است. البته چگالی در تمام معادلات حل‌شده ثابت است، به‌جز در ترم شناوری در معادله مومنت که به‌صورت زیر است:

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (4)$$

در این معادله ρ_0 چگالی (ثابت) جریان، T_0 دمای کاری و β ضریب انبساط حرارتی است. انرژی کل جذب‌شده توسط PCM (سولفات سدیم) طی شارژ یا دشارژ را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [20]:

$$Q_{pcm} = m_{pcm}c_s(T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} < T_{melt}$$

$$Q_{pcm} = 0 \quad T_{pcm} = T_{melt}$$

$$Q_{pcm} = m_{pcm}c_l(T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} > T_{melt}$$

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_i = Q_0 + Q_r} \quad (5)$$

$$Q_0 = mc_p(T_0 - T_i)$$

در این معادله Q_0 گرمای دریافتی توسط هوا، Q_r تابش دریافتی توسط شیشه و c_p ظرفیت گرمایی ویژه است [21].

انتخاب ماده PCM و طراحی محفظه نگه‌دارنده

برای آنکه کارایی این دستگاه افزایش یابد از ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است و برای انتخاب ماده PCM مناسب موارد متعددی مطرح است که برخی از آنها شامل موارد زیر است:

- ۱- دمای ذوب و انجماد ماده PCM در محدوده دمایی که در دستگاه است، قرار گیرد.
- ۲- چرخه ذوب و انجماد برای یک عمر طولانی تداوم داشته باشد.
- ۳- در دسترس باشد و قیمت مناسب داشته باشد.
- ۴- اثر مخرب آن بر سیستم لوله و محفظه نگه‌دارنده حداقل باشد.
- ۵- خواص گرمایی مناسب داشته باشد.

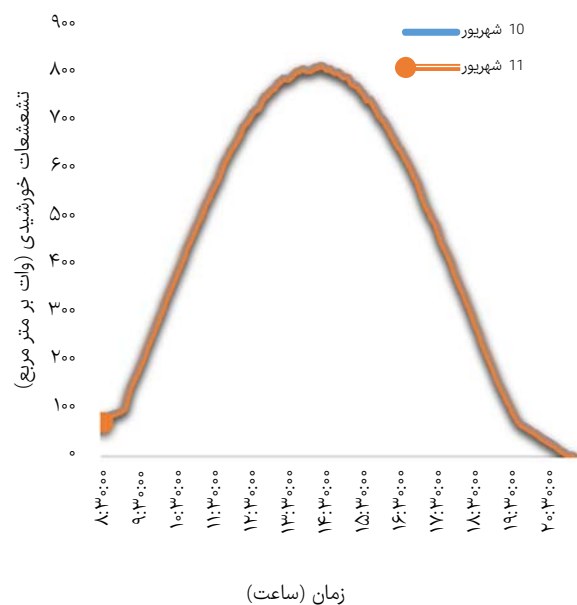
ماده تغییر فازدهنده مورد استفاده در تهویه‌ساز خورشیدی سدیم سولفات کربنات $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ محصول شرکت ایران اسید [22] بوده و مشخصات آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود. برای قراردادن ماده PCM، آن را به‌صورت پودر در لوله‌های مسی شکل که به‌صورت شبکه‌ای درآمده ریخته می‌شود، که توسط

دمای تهویه‌ساز خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز پدیده در نمودار ۲ را نشان می‌دهد. از دقت به نمودار می‌توان به این مهم پی برد که تعبیه این مواد در سیستم توانسته است به‌طور قابل قبولی در اُفت دمای تهویه‌ساز در ساعاتی از شبانه‌روز که تشعشع خورشیدی وجود ندارد نقش مهمی داشته باشند. هر چند دمای تهویه‌ساز در ساعات ظهر و بیشینه حضور تشعشع خورشیدی نسبت به دمای تهویه‌ساز در غیاب مواد تغییر فازدهنده کمی کمتر است، که این مقدار انرژی همان طور که به نظر می‌رسد صرف گرم و در نهایت ذوب‌شدن مواد تغییر فازدهنده می‌شود. این مطلب به این معنا است که استفاده از مواد تغییر فازدهنده به نوعی موجب کاهش دمای بیشینه می‌شود. در عین حال این امر امکان داشتن یک سیستم تهویه طبیعی که ملزم به تابش یکنواخت و پیوسته خورشید نباشد را فراهم می‌سازد. همان گونه که از نمودار برداشت می‌شود اختلاف دمای بین محیط و سیستم به مقدار قابل نیاز افزایش یافته که خود تأثیر مواد تغییر فازدهنده را به خوبی نشان می‌دهد. در حقیقت هدف اصلی استفاده از مواد تغییر فازدهنده در تهویه خورشیدی غیرفعال همین اثر، یعنی استفاده از انرژی اضافی در موارد فقدان انرژی است.

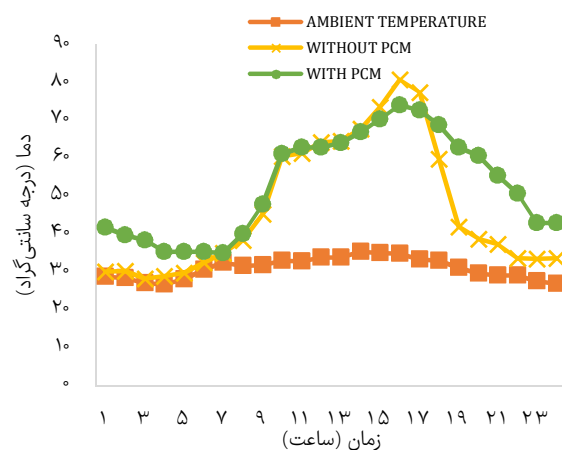
همین طور که مشاهده شد، دمای تهویه‌ساز با و بدون مواد تغییر فازدهنده در ساعت ۶ صبح به هم نزدیک شده و این امر به این دلیل بوده که گرمای ذخیره‌شده در مواد تغییر فازدهنده از دست رفته و اکثر آنها به‌صورت جامد درآمده‌اند. از این رو، دمای تهویه‌ساز در هر دو حالت به دمای محیط نزدیک شده است. همچنین این نکته حایز اهمیت است که دمای تهویه‌ساز در حالت وجود مواد تغییر فازدهنده از ۳ بامداد تا ۸ صبح برخلاف دمای محیط و دمای متوسط تهویه‌ساز بدون مواد تغییر فازدهنده اُفت می‌کند. از آنجا که خورشید حدود ساعت ۶ طلوع می‌کند دمای محیط و تهویه‌ساز بدون مواد تغییر فازدهنده کمی بیشتر شده ولی دمای تهویه‌ساز مجهز به مواد تغییر فازدهنده با داشتن ظرفیت گرمایی بیشتر کمی دیرتر افزایش می‌یابد. دمای متوسط تهویه‌ساز با و بدون مواد تغییر فازدهنده تقریباً به حالت متقارن نسبت به ساعت ۱۵ ظهر با هم برابر می‌شوند. با مقایسه نمودار نوسانات دمای تهویه‌ساز شیب نمودار بدون مواد تغییر فازدهنده بیشتر از تهویه‌ساز حاوی مواد تغییر فازدهنده است.

سرعت جریان هوا در ورودی تهویه‌ساز بدون مواد تغییر فازدهنده در نمودار ۳ نشان داده شده است. نتیجه بیانگر این است که سیستم مذکور توانسته است در بخشی از ساعات مشهود در نمودار موجب جابه‌جایی طبیعی هوا باشد، که بخش بیشینه آن مربوط به ساعات ۲ تا ۴ بعدازظهر و مقدار کمینه آن به ساعات اولیه صبح و ساعات اولیه شب باز می‌شود و این گویای رابطه مستقیم تشعشع خورشیدی و مقدار سرعت جریان هوا برای تهویه طبیعی سیستم است، که در این ساعات سرعت به صفر رسید هوا عملاً جریانی در سیستم به جهت اختلاف دما وجود نخواهد داشت. همچنین با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده نتیجه می‌شود که

دمای تهویه‌ساز خورشیدی بدون مواد تغییر فازدهنده در طی شبانه‌روز در نمودار ۲ نشان داده شده است. آشکار است که در این بازه زمانی دمای تهویه‌ساز به ۸۲ درجه رسیده در حالی که دمای محیط تنها ۳۴ درجه است که این خود تأثیر مواد جاذب و عایق‌بندی مناسب بوده است، که این تغییرات دمایی برای گردش هوا به خودی خود کافی است. منتهی همان طور که از نمودار برداشت می‌شود، این اختلاف دما تنها مربوط به بخشی از ساعات روز است، لذا در ساعات اولیه شب دمای تهویه‌ساز تقریباً با دمای محیط یکسان شده و پدیده دودکشی جهت تهویه امکان‌پذیر نخواهد بود. همچنین بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده در جمع‌کننده خورشیدی تغییرات دما طی شبانه‌روز به‌طور قابل توجهی بیشتر است، که این خود عیب دیگری از طراحی تهویه‌ساز خورشیدی را نشان می‌دهد که تنش حرارتی اعمال‌شده بر آن در کل ساعات شبانه‌روز وجود دارد.

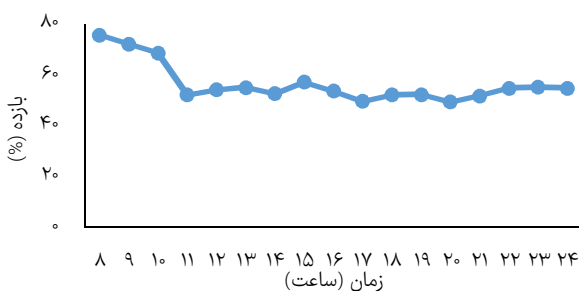


نمودار ۱) شدت تابش خورشیدی در روزهای انجام آزمایشات



نمودار ۲) تغییرات دمای تهویه‌ساز خورشیدی با و بدون مواد تغییر فازدهنده در روز دهم شهریور ۱۳۹۷

با مقایسه نتایج مربوط به دمای محیط، دمای تهویه‌ساز خورشیدی و نرخ جریان هوا در تهویه‌ساز خورشیدی، می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که با وجود بالاتر بودن دمای بیشینه تهویه‌ساز در وضعیت فاقد مواد تغییر فازدهنده و همچنین بیشتر بودن بیشینه نرخ جریان در این وضعیت نسبت به وضعیت همراه با مواد تغییر فازدهنده در اکثر ساعات شبانه‌روز دمای متوسط تهویه‌ساز در وضعیت مجهز به مواد تغییر فازدهنده بالاتر است. همان طور که در نمودار ۴ نرخ تغییرات جریان در حضور مواد تغییر فازدهنده مشاهده شد، با مقایسه هر دو حالت شاهد اهمیت مساله از نوع دوم خواهیم بود. با توجه به نمودار ۵، بازده خورشیدی در روز ۱۰ شهریور در حضور ماده PCM در محدوده ۵۵ تا ۷۵٪ قرار می‌گیرد که برای این ماه سال مناسب است.



نمودار ۵) بازده تهویه‌ساز خورشیدی در روز دهم شهریور ۱۳۹۷

نتیجه‌گیری

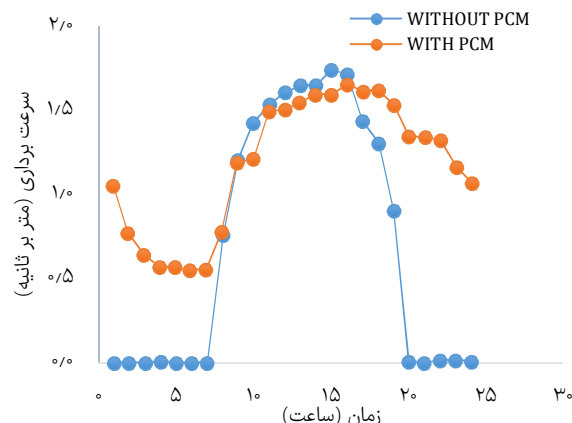
تهویه مکان‌ها امری ضروری است که اگر به‌صورت طبیعی انجام گیرد آلودگی محیط زیست را به همراه نداشته و اقتصادی است. بر این اساس دستگای طراحی و ساخته شده که در آن سعی شده است تلفات انرژی به حداقل برسد و بالاترین کارایی را داشته باشد. از این رو، سطح شفاف برای عبور نور دو جداره بوده و این قابلیت فراهم شده که از همگی جهات بتواند تابش خورشید را دریافت نماید. علی‌رغم وجود سایه در محل مورد استفاده، در روزی نظیر ۱۰ شهریور دبی حجمی هوا در یک ساعت به‌طور متوسط به ۹۵ متر مکعب رسیده است که می‌تواند فضایی به ابعاد ۳×۴×۳ را ۲/۶ دفعه تعویض هوا نماید ($ACH=2/6$). این نتیجه در حضور ماده PCM است. عدد محاسبه‌شده با توجه به ابعاد و اندازه دستگاه در مقایسه با سایر موارد بررسی‌شده عدد نسبتاً خوبی است، اگر چه در ماه‌های گرم سال این عدد بیشتر خواهد شد. همچنین طبق نتایج به‌دست‌آمده در طول شب نیز عمل تهویه با شدت نسبتاً خوبی می‌تواند ادامه یابد.

ذخیره‌سازی انرژی به‌علت ظرفیت گرمایی بیشتر طی تغییر فاز مواد تغییر فازدهنده به‌کار گرفته شد. با این کاربرد با استفاده از فضای کمتر انرژی قابل ملاحظه‌ای ذخیره می‌شود. محیطی که با تهویه‌ساز خورشیدی برای گردش هوا و گرمایش یک‌پارچه شده جهت نمایش تأثیر مواد تغییر فازدهنده در گرمایش غیرفعال در نظر گرفته شده است. هندسه این طرح در دو وضعیت با و بدون استفاده از مواد تغییر فازدهنده در تهویه‌ساز خورشیدی مورد

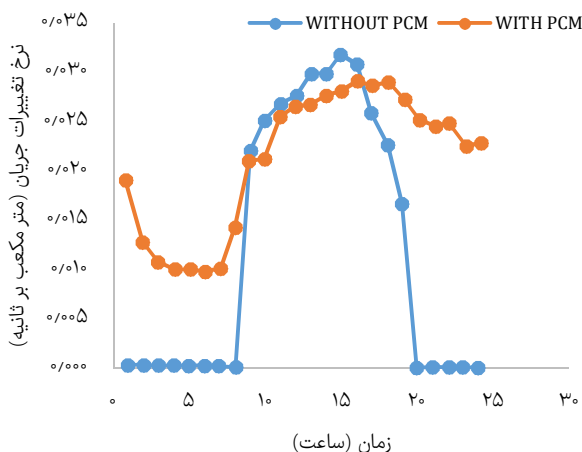
بیشترین سرعت گردش هوا در مجاورت محفظه داخلی کلکتور جایی که بیشترین تفاوت دمایی به وجود می‌آید، است. به هر حال این مقدار سرعت به خودی خود نقش مهمی در تعویض هوای محیط در دسترس را خواهد داشت.

در نمودار ۳ به تأثیر مواد تغییر فازدهنده در سرعت جریان هوا در سیستم پرداخته است، آن چه از نمودار استنتاج می‌شود این است که تقریباً کمیت سرعت در طول شبانه‌روز دارای مقدار است و همواره جریان وجود خواهد داشت لذا از این حیث اهمیت ذخیره‌سازی انرژی قابل توجه و مشهود است.

از نمودار ۴ ملاحظه می‌شود که نرخ جریان هوا در حالت تهویه‌ساز خورشیدی بدون مواد تغییر فازدهنده دارای بیشینه و کمینه به‌ترتیب ۱۱۵ و ۶۱/۲ متر مکعب بر ساعت و همچنین نرخ جریان هوا در حالت مجهز به مواد تغییر فازدهنده دارای بیشینه و کمینه به‌ترتیب ۱۰۸ و ۳۲/۷۶ متر مکعب بر ساعت است. چنان چه انتظار می‌رود نرخ جریان هوای ایجادشده در حالت مجهز به مواد تغییر فازدهنده به نسبت تغییرات کمتری دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که نرخ جریان هوا در وضعیت همراه با مواد تغییر فازدهنده دیرتر از حالت دیگر رخ می‌دهد.



نمودار ۳) تغییرات سرعت جریان هوای ورودی به تهویه‌ساز خورشیدی با و بدون مواد تغییر فازدهنده در روز دهم شهریور ۱۳۹۷



نمودار ۴) نرخ تغییرات جریان تهویه‌ساز خورشیدی در حالت با و بدون مواد تغییر فازدهنده در روز دهم شهریور ۱۳۹۷

- 4- Zhang YP, Lin KP, Yang R, Di HF, Jiang Y. Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*. 2006;38(10):1262-1269.
- 5- Xiao W, Wang X, Zhang Y. Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room. *Applied Energy*. 2009;86(10):2013-2018.
- 6- Tyagi VV, Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007;11(6):1146-1166.
- 7- Borreguero AM, Luz Sánchez M, Valverde JL, Carmona M, Rodríguez JF. Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. *Applied Energy*. 2011;88(3):930-937.
- 8- Kuznik F, Virgone J, Noel J. Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(11-12):1291-1298.
- 9- Arnault A, Mathieu-Potvin F, Gosselin L. Internal surfaces including phase change materials for passive optimal shift of solar heat gain. *International Journal Thermal Sciences*. 2010;49(11):2148-2156.
- 10- Qureshi WA, Nair N-KC, Farid MM. Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management. *Energy Conversion Management*. 2011;52(5):2110-2120.
- 11- Heim D, Clarke JA. Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings*. 2004;36(8):795-805.
- 12- Afonso C, Oliveira A. Solar chimneys: Simulation and experiment. *Energy and Buildings*. 2000;32(1):71-79.
- 13- Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS. Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Building and Environment*. 1993;28(3):373-377.
- 14- Gan G, Riffat SB. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of buildings with heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 1998;18(12):1171-1187.
- 15- Wang H, Lei C. A numerical investigation of combined solar chimney and water wall for building ventilation and thermal comfort. *Building and Environment*. 2020;171:106616.
- 16- Abdallah ASH. A new design of passive air condition integrated with solar chimney for hot arid region of Egypt. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;16(6):2611-2618.
- 17- Imran AA, Jalil JM, Ahmed ST. Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney. *Renewable Energy*. 2015;78:236-244.
- 18- Khanal R, Lei C. An experimental investigation of an inclined passive walls solar chimney for natural ventilation. *Solar Energy*. 2014;107:461-474.
- 19- Ren X-H, Liu R-Z, Wang Y-H, Wang L, Zhao F-Y. Thermal driven natural convective flows inside the solar chimney flush-mounted with discrete heating sources: Reversal and cooperative flow dynamics. *Renewable energy*. 2019;138:354-367.
- 20- Goyal RK, Tiwari GN. Effect of thermal storage on the performance of a deep bed drying system. *International Journal Ambient Energy*. 1999;20(3):125-136.
- 21- Li Y, Liu S. Experimental study on thermal performance of a solar chimney combined with PCM. *Applied Energy*. 2014;114:172-178.
- 22- Iran acid. The center of organic matter, mineral, and chemical of iran Sodium sulfate production [Internet]. Tehran: Iran Acid; 2019 [cited 2019 October 26]. Available from: <http://iran-asid.ir/Sodium-sulfate-production/>

تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که:

- ۱- با استفاده از مواد تغییر فازدهنده به‌عنوان سیستم نگه‌دارنده انرژی حرارتی دمای محیط مربوطه را طی شبانه‌روز می‌توان بکناخت نگاه داشته در حالی که بدون استفاده از این مواد نوسانات دمایی خواهیم داشت.
- ۲- مواد تغییر فازدهنده به‌طور قابل ملاحظه‌ای موجب بکناخت شدن دمای تهویه‌ساز خورشیدی و همچنین کاهش دمای بیشینه آن می‌شوند. این امر سیستمی با قابلیت اطمینان بالاتر را نتیجه می‌دهد.
- ۳- استفاده از تهویه‌ساز خورشیدی مجهز به مواد تغییر فازدهنده برای تهویه، دمای محیط مورد نظر را به دمای آسایش نزدیک‌تر کرده و کاهش مصرف انرژی را در بر دارد.
- از دیدگاه اقتصادی با توجه به استفاده از ماده PCM در دستگاه تهویه خورشیدی کارایی را افزایش داده و در زمستان می‌تواند با طراحی مسیر مناسب گردش هوا یک اتاق به ابعاد ۳×۴×۳ را گرم نگه دارد. این دستگاه در مقابل تابش خورشید حساس بوده و با مصالح انتخاب‌شده کارایی خوبی دارد و پایداری و چرخه ذوب و انجماد ماده PCM در آزمایش‌های مکرر محرز شده است. بنابراین از دیدگاه زیست‌محیطی و محدودیت‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی و تأمین هزینه آنها، استفاده از این دستگاه با در نظر گرفتن تمامی جوانب توصیه می‌شود. هزینه ساخت دستگاه در شرایط عادی ایران پایین است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، به‌واسطه حمایت مادی و معنوی از کار پژوهشی انجام‌شده، مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام نمایند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد هستند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: محمد صالح برقی‌چهرمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ ولی کلانتر (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ مهران عبدالرضایی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Mokhtarian M, Tavakolipour H, Kalbasi Ashtari A. Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts. *LWT-Food Science and Technology*. 2017;75:202-209.
- 2- Mondal S. Phase change materials for smart textiles-an overview. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(11-12):1536-1550.
- 3- Turnpenny JR, Etheridge DW, Reay DA. Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2000;20(11):1019-1037.