

## بررسی تأثیر تخلخل بر عملکرد ترموهیدرولیکی یک کلکتور هواگرم خورشیدی به همراه موانع متخلخل

امین قلعه‌نویی<sup>۱</sup>

مجید سبزپوشانی<sup>۲\*</sup>

[spooshan@kashanu.ac.ir](mailto:spooshan@kashanu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۱

### چکیده

زمینه و هدف: به دلیل خواص فیزیکی-حرارتی نامطلوب هوا، کلکتورهای هواگرم از راندمان حرارتی بالایی برخوردار نیستند و نیاز است تا به کمک شیوه‌های مختلف راندمان آنها را بهبود بخشید. در این پژوهش به صورت تجربی تأثیر استفاده از موانع متخلخل بر روی عملکرد گرمایی و هیدرولیکی کلکتور مورد بررسی قرار گرفت و با عملکرد یک کلکتور ساده مقایسه شد.

روش بررسی: یک دستگاه کلکتور هواگرم خورشیدی طراحی و ساخته شد و تحت شرایط محیطی شهرستان آبادان در استان خوزستان مورد آزمایش قرار گرفت. سه نوع مختلف موانع متخلخل با سه اندازه سوراخ (۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر) بر روی صفحه جاذب کار گذاشته شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل دمای هوای ورودی و خروجی، دمای صفحه جاذب، افت فشار و تابش خورشید می‌شود. اندازه‌گیری‌ها در ماه آذر برای دو مقدار مختلف جریان جرمی هوا (۰/۲۱۸ و ۰/۳۶۴ کیلوگرم بر ثانیه) انجام شد.

یافته‌ها: مشخص شد که استفاده از موانع متخلخل باعث افزایش اختلاف دما بین ورودی و خروجی از کلکتور و راندمان سیستم در مقایسه با یک کلکتور ساده می‌شود. همچنین مشخص شد که در تمامی موارد با افزایش دبی جرمی، راندمان گرمایی و مؤثر سیستم افزایش و اختلاف دمای بین هوای ورودی و خروجی کاهش می‌یابد. اختلاف دما در بهترین حالت (موانع با سوراخ‌های ۳ cm) برای هر دو دبی ۲ برابر نسبت به کلکتور ساده افزایش داشت. همچنین بیشترین مقدار میانگین راندمان گرمایی برای دو دبی ۰/۶۸٪ و ۰/۸۳٪ و میانگین راندمان مؤثر ۲۸/۴٪ و ۳۴/۱٪ به دست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری: با کاهش ابعاد سوراخ‌های درون موانع، نرخ انتقال حرارت و راندمان گرمایی کلکتور به‌واسطه افزایش اغتشاش جریان افزایش می‌یابد. این امر موجب بالا رفتن افت فشار نیز می‌گردد اما همچنان تأثیر مثبت افزایش اختلاف دما بر تأثیر منفی افزایش افت فشار غلبه می‌کند و در نهایت مشخص می‌شود نسبت مستقیمی بین زیاد شدن راندمان مؤثر با کم شدن اندازه قطر سوراخ‌ها وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: هواگرم‌کن خورشیدی، موانع متخلخل، راندمان گرمایی، راندمان مؤثر، افت فشار.

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

# **Investigation the effect of porosity on the thermohydraulic performance of a solar air collector with perforated obstacles**

**Amin Ghalenoei**<sup>1</sup>

**Majid Sabzpooshani**<sup>2\*</sup>

[spooshan@kashanu.ac.ir](mailto:spozshan@kashanu.ac.ir)

Admission Date: August 31, 2022

Date Received: April 10, 2021

## **Abstract**

**Background and Objective:** Due to undesirable thermo-physical properties of the air, the solar air collectors do not benefit from the high thermal efficiency and need to be improved with the help of different methods. In this study, the effects of using various obstacles on the thermohydraulic performance of a collectors were examined experimentally and compared to the performance of a simple collector.

**Material and Methodology:** A solar air collector was designed, built and tested under the environmental conditions of Abadan city in Khuzestan province. Three different perforated obstacles with three hole sizes (3, 4 and 5 cm) were placed on the absorber plate. Measured parameters include the temperature of inlet and outlet air, absorber plate, pressure drop and solar radiation. Measurements were made for two different air flux (0.0218 and 0.0364 kg/s).

**Findings:** It has become clear that using various perforated obstacles increases the temperature difference between inlet and outlet air and subsequently their efficiencies compared to a simple conventional collector. It was also noted that in all cases, the increase in mass flowrate causes increasing the effective and thermal efficiency of system and decreasing the temperature difference between inlet and outlet air. Temperature difference in the best case (perforated obstacles with 3 cm holes) for each of the two flowrates increases twice compared to the simple collector. Also, the highest amount of average efficiency for two flowrates is 68% and 83% and the average effective efficiency is 28.4% and 34.1%.

**Discussion and Conclusion:** With the reduction of sizes of the holes in the perforated obstacles, the rate of heat transfer and subsequently the thermal efficiency of the collector will increase due to increasing the turbulence of the flow. This causes the pressure drop to rise up as well but also has a positive effect of increasing the temperature difference which dominates the negative effect of the pressure drop and eventually it becomes clear that there is a direct relation between increasing the effective efficiency with reducing the size of the holes.

**Keywords:** Solar air heater, perforated obstacles, thermal efficiency effective efficiency, Pressure drop.

---

1- PhD student, Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran.

2- PhD, Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty and Energy Research Institute, University of Kashan, Kashan, Iran. \*(Corresponding Author)

## مقدمه

افزایش آلودگی هوا و ایجاد گرمایش جهانی در اثر استفاده بی-رویه از سوخت‌های فسیلی، توجه عموم را به سمت تغییرات آب و هوایی معطوف نموده است. بر همین اساس انتظار افزایش تقاضا برای سایر انرژی‌های جایگزین به خصوص انرژی خورشیدی قابل پیش‌بینی است. در کشور ما ایران نیز بحث استفاده از این انرژی با توجه به پتانسیل بالای منطقه در دریافت تابش‌های خورشیدی، همواره به‌عنوان یکی از اولویت‌های سرمایه‌گذاری وزارت صمت مطرح بوده است (۱). آب‌گرم-کن خورشیدی و هواگرم‌کن خورشیدی به‌طور معمول برای کاربردهای حرارتی خانگی و سایر کاربردهای دما پایین گرمایی استفاده می‌شوند. پیشرفت‌های حاصل شده در دهه گذشته در زمینه هواگرم‌کن‌ها منجر به سادگی ساخت و پایین آمدن قیمت آن شده است. از هواگرم‌کن‌ها معمولاً برای تهیه هوای گرم جهت خشک کردن محصولات کشاورزی و پیش‌گرمایش هوای تازه در صنایع، تهویه مطبوع، آب گرم خانگی، خشک‌کن‌ها و دیگر فرآیندهای صنعتی و حرارتی استفاده می‌شود. هواگرم‌کن‌های صفحه تخت به لحاظ سادگی ساختار، قطعات مورد نیاز، قیمت، پیچیدگی و تعمیر و نگهداری برتر از آب‌گرم‌کن‌ها هستند. همچنین در عمل با مشکلاتی از قبیل گرفتگی، نشستی، خوردگی و یخ بستن آب مواجه نمی‌شوند. با وجود تمامی این مزایا، برخی معایب نیز وجود دارد که باعث محدود شدن عملکرد حرارتی آن‌ها می‌گردد. نظر به خواص فیزیکی-حرارتی نامطلوب هوا مانند چگالی کم و ظرفیت حرارتی پایین، نرخ انتقال حرارت بین صفحه جاذب و جریان سیال کم است، که در نتیجه منجر به کمتر شدن راندمان حرارتی هواگرم‌کن‌های خورشیدی می‌گردد.

به منظور بهبود عملکرد حرارتی هواگرم‌کن‌ها، تغییرات مختلفی در ساختار این وسیله توسط محققان مطرح و بحث شده است. از مهم‌ترین تغییرات ایجاد شده در ساختار ساده اولیه هواگرم-کن، اضافه نمودن زبری‌های مصنوعی، بافل‌ها و یا موانعی در کانال عبور هوا است. این امر منجر به آشفته شدن جریان و در نتیجه بالا رفتن ضریب انتقال حرارت بین هوا و صفحه جاذب

می‌شود. افزایش ضریب انتقال حرارت به معنای افزایش انتقال حرارت همرفتی بین هوا و جاذب است که گرمای مفید دریافتی را بیشتر نموده و منجر به بهبود راندمان گرمایی سیستم می‌گردد. اما از سوی دیگر افت فشار درون کانال نیز با بیشتر شدن موانع افزایش پیدا خواهد کرد که این امر نیز منجر به افزایش توان ورودی دمیده شده و در نتیجه راندمان کلکتور کاهش پیدا می‌کند. محققان همواره به دنبال ترکیب بهینه‌ای هستند که حداکثر افزایش نرخ انتقال حرارت را با حداقل افت فشار به همراه داشته باشد.

احمد زید و همکاران (۲) و آبنه و همکاران (۳) موانع مختلفی را در مسیر هوا درون یک کلکتور خورشیدی به کار بردند تا دمای خروجی هوا از کلکتور را افزایش داده و زمان لازم برای خشک کردن محصولات کشاورزی (پیاز زرد و انگور) را به نسبت وقتی که از کلکتور بدون موانع استفاده می‌شود کاهش دهند. این موانع عبارت بودند از طاق معکوس، طاق تا شده، لوله خم شده، و طاق و دلتای خم شده. هاندویو و همکاران (۴) شکل دیگری از موانع مثلثی را در کلکتورهای چین‌دار استفاده نموده و انتقال حرارت و افت فشار را برای فواصل مختلف به صورت تجربی سنجیدند. مشخص شد که با کاهش نسبت «فاصله به ارتفاع» موانع تا مقدار ۰/۵، عدد ناسلت در مقایسه با حالتی که از موانع درون کلکتور استفاده نمی‌شود، حدود ۳/۵ برابر و ضریب اصطکاک حدود ۲۰ برابر افزایش می‌یابد. آنها از دینامیک سیالات محاسباتی نیز کمک گرفتند تا فاصله بهینه‌ای را بیابند که در آن بیشترین مقدار عدد ناسلت با کمترین میزان ضریب اصطکاک حاصل می‌شود. کولکارنی و همکاران (۵) یک کلکتور به همراه موانع را با هدف رسیدن به حداکثر انتقال گرما و حداقل افت فشار به صورت چندمنظوره بهینه‌سازی نمودند. این بهینه‌سازی متوجه پارامترهای هندسی نظیر نسبت ارتفاع موانع به ارتفاع کانال عبور هوا بود. عالم و کیم (۶) عملکرد گرمایی و هیدرولیکی کلکتور خورشیدی را با موانع نیمه بیضوی در زوایای حمله و رینولدزهای مختلف به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. روابط عددی مربوط به عدد ناسلت و ضریب

۱/۹۹ برابر و آگرژی ۲/۰۳ برابر راندمان کلکتور به همراه صفحه جاذب ساده حاصل شد. ساراوان و همکاران فین‌های C شکل را در دو حالت متخلخل و غیرمتخلخل درون یک کلکتور به کار بردند و عملکرد ترموهیدرولیکی سیستم را با آنها بررسی نمودند. آزمایش‌ها در محدوده رینولدز ۳۰۰۰ تا ۲۷۰۰۰ انجام شد و تأثیر پارامترهایی نظیر گام نسبی، ارتفاع نسبی و نسبت تخلخل نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک از روی داده‌های تجربی ارائه شد. دنگ و همکاران مطالعه‌ای عددی بر روی هواگرمان‌های خورشیدی به همراه صفحات موج انجام دادند. در این کار تأثیر سه پارامتر دامنه گودی‌ها، زاویه حمله و تعداد آرایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. محدود عدد رینولدز در این کار بین ۱۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ بود. مشخص شد که شیب گودی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سیال عامل برای تولید جریان چرخشی طولی درون کانال کلکتور دارند. سورندهار و همکاران یک مدل گرمایی برای تحلیل تأثیر ترتیب فین‌های دنده‌ای قوس‌دار و طول صفحه جاذب بر روی خصوصیات انتقال حرارت یک هواگرمان خورشیدی توسعه دادند. دو نسبت ارتفاع زبری و دو طول کلکتور مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد ترتیبی که در آن فین‌های دنده‌ای قوسی متغیر است، منجر به بهره برداری حداکثری از انرژی خورشیدی موجود و بالاترین دمای خروجی نسبت به حالت بدوت تغییر و کلکتور ساده می‌شود.

با بررسی مقالاتی که در آنها با استفاده از موانعی درون کانال عبور هوا، عملکرد کلکتورهای هواگرم را مورد بررسی قرار دادند مشخص شد که کمتر به حالتی پرداخته شده است که موانع استفاده شده متخلخل شده باشند. به عبارت دیگر با وجود سوراخ‌ها و حفره‌هایی درون مانع، هوا از درون موانع نیز عبور کند. این امر موجب افزایش اغتشاش جریان بر روی موانع و همچنین مناطق نزدیک به حفره‌های درون موانع می‌گردد. همچنین سطح تبادل حرارت نیز به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در کار حاضر به صورت تجربی به استفاده از موانع متخلخل در مسیر هوا پرداخته می‌شود و برای دبی‌های مختلف تأثیر ابعاد سوراخ‌ها بر روی انتقال حرارت و افت فشار درون این

اصطکاک برای موانع کماتی و V شکل درون کلکتورهای خورشیدی از روی داده‌های تجربی در کار دیگری ارائه شده است (۷-۸). بن ساچی و همکاران (۹) با هدف بهبود عملکرد حرارتی و هیدرولیکی هواگرم‌کن‌های خورشیدی مطالعه‌ای بر روی موقعیت‌های مختلف بافل‌ها درون کلکتور انجام دادند. موقعیت بافل‌های جدید نشان می‌دهد که عملکرد هیدرولیکی موثر فقط تابعی از شکل و یا تغییرات هندسی بافل‌ها نیست. جانمایی صحیح بافل‌ها عملکرد ترموهیدرولیکی هوا گرم‌کن خورشیدی را به طرز چشمگیری بهبود می‌بخشد. لوان و فو (۱۰) بر اساس داده‌های تجربی روابطی را برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک درون یک کلکتور خورشیدی با بافل‌های شیب‌دار ارائه نمودند. زاویه شیب بافل از ۰ تا ۱۸۰ درجه متغیر بود. تجزیه و تحلیل راندمان آگرژی نشان داد که بیشترین بازده کلکتور برابر ۰/۷ درصد در زاویه بافل ۶۰ و عدد رینولدز ۱۵۰۰ به دست می‌آید. شارما و همکاران (۱۱) موانع جریان با شکل‌های مختلف مطابق با هندسه‌های مختلف و تحت ملاحظات مختلف دبی جرمی جریان را مورد بررسی قرار دادند تا یک طراحی بهتر برای کلکتور خورشیدی پیشنهاد دهند. سراواناکوما و همکاران (۱۲) تأثیر اضافه کردن فین و بافل را به یک کلکتور زبر با دنده‌های قوسی بررسی نمودند. تغییرات پارامترهای جریان مانند عدد رینولدز و افزایش دما با توجه به پارامترهای طراحی بافل ارائه شده است. کلکتور پیشنهادی در مقایسه با هواگرمان خورشیدی زبر به همراه دنده‌های قوسی، بازده انرژی و موثر را به ترتیب ۲۸/۳ و ۲۷/۱ درصد بهبود می‌بخشد. آنها عملکرد آگرژی این کلکتور را نیز بررسی نمودند (۱۳). همچنین بهینه‌سازی پارامترهای این کلکتور به همراه الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. مشخص شد که حداکثر راندمان آگرژی هواگرمان پیشنهادی ۵/۲٪ در شرایط بهینه شده است. کومار و لایک بررسی‌های تجربی بر روی عملکرد یک هواگرمان خورشیدی انجام دادند که از بالچه‌هایی به عنوان المان‌های زبری بر روی صفحه جاذب کار گذاشته شده بود. عملکرد کلکتور در قالب راندمان‌های انرژی، موثر و آگرژی مقایسه شد. همچنین با انجام بهینه‌سازی عددی مقادیر بهینه راندمان‌ها به دست آمد که راندمان گرمایی ۲/۱۲ برابر، موثر

ارتفاع دارد که اتلاف حرارت از طریق جابجایی را از پایین جاذب به حداقل می‌رساند. در سطح زیرین این کانال نیز مجدداً دو ورق چوب به ضخامت  $3/2$  سانتی‌متر قرار دارد.

در این مطالعه از سه ترکیب مختلف موانع بر روی صفحه جاذب در کلکتور استفاده شد. شش مانع هم ارتفاع با کانال (۶ cm) به صورت عرضی و با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از هم بر روی جاذب چسبانده شدند. درون هر مانع شش سوراخ جهت عبور هوا و اغتشاش جریان تعبیه شده است. در نوع اول موانع (Type I)، قطر سوراخ‌ها برابر ۵ سانتی‌متر، در نوع دوم (Type II) برابر ۴ سانتی‌متر و در نوع سوم (Type III) برابر ۳ سانتی‌متر است. سطح مقطع عبور هوا با وجود این موانع به ترتیب ۱۳، ۲۴ و ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. عملکرد کلکتور به همراه این سه نوع مانع با عملکرد کلکتور معمولی (صفحه جاذب ساده) مقایسه می‌شود تا مشخص شود استفاده از این موانع تا چه میزان بر عملکرد کلکتور تأثیرگذار است. موانع استفاده شده از جنس آهن گالوانیزه و ضخامت آنها برابر با  $0/6$  میلی‌متر است. در شکل ۲ نوع دوم (موانع سوراخ‌دار به قطر ۴ سانتی‌متر) برای نمونه نمایش داده شده است. این موانع همانند صفحه جاذب به رنگ مشکی درآمده‌اند.

بعد از نصب و راه‌اندازی دستگاه، در آذرماه عملکرد کلکتورها تحت شرایط آب و هوایی معمول مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه دمنده هر روز از ساعت ۸:۳۰ روشن شده و بعد از پایدار شدن شرایط کلکتور، از ساعت ۹ تا ۱۶ هر ۵ دقیقه تمامی داده‌های دمایی توسط یک دستگاه دیتالاگر ثبت می‌گشت. مقادیر تابش نیز هر سی دقیقه یادداشت‌برداری شد.

کلکتور بررسی می‌شود و عملکرد آن در مقایسه با یک کلکتور ساده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### روش بررسی

یک دستگاه کلکتور هواگرم خورشیدی در شهرستان آبادان طراحی و ساخته شد (شکل ۱). شهرستان آبادان واقع در استان خوزستان که مرکز آن در طول جغرافیایی  $17^{\circ} 48'$  و عرض جغرافیایی  $20^{\circ} 30'$  قرار دارد، با مجموعه سالانه ۳۲۷۵ ساعت (۱۸) از پتانسیل بسیار خوبی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردار است. به همین دلیل، استفاده از سیستم‌های خورشیدی در این شهر، از لحاظ محاسبات برگشت سرمایه مقرون به صرفه و در حال توسعه است.

مهمترین جزء کلکتور صفحه جاذب می‌باشد که وظیفه جذب تشعشعات خورشیدی را بر عهده دارد. از یک ورق آهنی به رنگ مشکی به ضخامت  $1/5$  میلی‌متر، به عنوان جاذب استفاده شد. ابعاد صفحه جاذب عبارت است از  $120$  سانتی‌متر طول و  $53$  سانتی‌متر عرض. ارتفاع کانالی که هوا از آن عبور می‌کند نیز برابر با  $6$  cm است (قطر هیدرولیک معادل  $10/78$  cm). از شیشه معمولی به ضخامت  $6$  mm به عنوان تک پوشش شفاف کلکتور استفاده شد. کلکتور ساخته شده یک کلکتور بالاگذر است؛ به این معنا که هوا از بین صفحه جاذب و پوشش شفاف عبور می‌کند. جنس بدنه کلکتور از چوب است که نقش عایق را نیز ایفا می‌کند. دیواره کلکتور از جنس چوب فشرده به ضخامت  $3/2$  سانتی‌متر است. از طرفی در زیر جاذب نیز یک کانال قرار دارد که هوای ساکن در آن جای گرفته است. این کانال  $8$  cm



شکل ۲- نمای شماتیک کلکتور هواگرم  
Figure 2. Schematic view of collector



شکل ۱- کلکتور هواگرم خورشیدی ساخته شده در شهرستان آبادان  
Figure 2. The solar air collector built in Abadan City

پارامترهای اندازه‌گیری شده در دوران داده‌برداری عبارتند از:

- دمای هوای خروجی
- دمای هوای ورودی
- تابش خورشید
- سرعت هوای خروجی
- دمای جاذب
- افت فشار درون کانال
- دمای محیط

خروجی از کلکتور نیز سنسورهای DS18B20 به کار گرفته شد. افت فشارهای حالات مختلف با استفاده از فشارسنج دیجیتال Testo 510 بین ابتدا و انتهای کانال کلکتور اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ مشخصات مربوط به وسایل اندازه‌گیری آورده شده است.

میزان کل تابش خورشیدی رسیده به سطح کلکتور با استفاده از دستگاه تابش‌سنج TES-1333R اندازه‌گیری شد. سرعت جریان هوا نیز به کمک بادسنج دیجیتال Mic-98652 در خروجی کلکتور اندازه‌گیری شد. هوا توسط یک دمنده گریز از مرکز با حداکثر قدرت ۵۵۰ وات (فشار ۲۴۰۰ پاسکال) تأمین می‌گشت. برای اندازه‌گیری دمای ورودی (دمای محیط) و دمای

#### جدول ۱- دستگاه‌های اندازه‌گیری و مشخصات آنها

Table 1. Measurement instrument and their specification

| دستگاه   | مدل       | محدوده                  | دقت                  |
|----------|-----------|-------------------------|----------------------|
| تابش‌سنج | TES-1333R | 0~2000 W/m <sup>2</sup> | 0.1 W/m <sup>2</sup> |
| بادسنج   | Mic-98652 | 30~0.4 m/s              | 3% FS                |
| فشارسنج  | Testo 510 | 0~2000 Pa               | 1 Pa                 |

#### تحلیل ریاضی عملکرد کلکتور

برای ارزیابی عملکرد یک کلکتور دو پارامتر اساسی نقش آفرینی می‌کند: راندمان گرمایی و راندمان مؤثر. برای به‌دست آوردن مقادیر این پارامترها باید از موارد اندازه‌گیری شده که در بخش قبل به آنها اشاره شد و همچنین روابط ریاضی ارائه شده بهره برد.

با دانستن دمای ورودی و خروجی هوا از کلکتور، و همچنین نرخ دبی جرمی، گرمای مفید (گرمای منتقل شده به هوا) را می‌توان از رابطه ۱ به‌دست آورد.

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (1)$$

که در آن  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا،  $T_o$  دمای خروجی از کلکتور و  $T_i$  دمای ورودی به کلکتور است. مقدار دبی جرمی هوا درون کانال از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = \rho AV \quad (2)$$

سرعت در نازل خروجی توسط بادسنج اندازه‌گیری می‌شود. سطح مقطع مورد استفاده برای اندازه‌گیری دبی ( $A$ ) نیز سطح

معمولاً یکسان نیست. در رابطه ۴ نیز تفاوتی میان انرژی الکتریکی و گرمایی قائل نشده است. در نتیجه نیاز است تا تأثیر هزینه انرژی لحاظ شود. قیمت واقعی انواع انرژی از قیمت بازار تخمین زده شد و نسبت انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی ۲/۳۵ در نظر گرفته شد (۲۱).

$$\eta_{eff} = \frac{(Q_u/2.35 - W_p/C_f)}{IA_C} \quad (۶)$$

#### یافته‌ها

عملکرد کلکتورها در شرایط آب و هوایی آفتابی در آذرماه از ساعت ۹ تا ۱۶ مورد بررسی قرار گرفت. افزایش راندمان کلکتورها توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود. همچنین کلکتورها برای دو دبی  $0.0218 \text{ kg/s}$  و  $0.0364 \text{ kg/s}$  (سرعت خروجی از نازل به ترتیب معادل  $6/6$  و  $11$  متر بر ثانیه) آزمایش شدند. هر ترکیب دو روز مورد آزمایش قرار گرفت؛ روز اول دبی کمتر ( $0.0218 \text{ kg/s}$ ) و روز دوم دبی بیشتر ( $0.0364 \text{ kg/s}$ ).

گرمای مفید منتقل شده به هوا و راندمان گرمایی مستقیماً از داده‌های ثبت شده برای هر کلکتور مورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج آزمایشگاهی در قالب نمودارها و جداولی که توصیف‌گر افزایش دما درون کلکتورها، راندمان گرمایی، راندمان مؤثر بودند، بر حسب زمان نمایش داده شده‌اند.

در شکل ۳ تغییرات ساعتی تشعشع برای روزهای آزمایش نشان داده شده است. برای وضوح بیشتر مقادیر تابش در دو نمودار نمایش داده شده است. تابش در روزهایی که کلکتور با دبی کمتر در حال داده‌برداری بود در شکل ۳-الف و برای روزهایی که با دبی بیشتر در حال داده‌برداری بود در شکل ۳-ب نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است بیشینه مقدار تابش بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۱۳:۳۰ (مقارن با ظهر خورشیدی) رخ داده است.

مقطع نازل در خروجی است که یک دایره به قطر ۶ سانتی‌متر می‌باشد.

راندمان لحظه‌ای گرمایی ( $\eta_{th}$ ) طبق تعریف عبارت است از نسبت گرمای مفید به تابش ورودی به سطح کلکتور:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{IA_C} = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{IA_C} \quad (۳)$$

حضور موانع هم باعث اغتشاش جریان می‌شود، و هم سطح تبادل حرارت با هوا را افزایش می‌دهد. در نتیجه انتظار می‌رود راندمان گرمایی کلکتور در حضور موانع بیشتر شود. اما اضافه کردن هر نوع مانعی به کانال باعث افزایش افت فشار درون کانال می‌گردد و کار دمنده بیشتری را طلب می‌کند. لذا بررسی عملکرد کلکتور (خصوصاً در مواقعی که تعداد موانع و یا دبی جرمی افزایش می‌یابد)، صرفاً بر مبنای راندمان گرمایی تحلیل درستی ارائه نمی‌دهد. در نتیجه نیاز است تا پارامتر قابل اعتمادتری معرفی گردد که کار دمنده را نیز در نظر بگیرد. از این رو راندمان مؤثر تعریف می‌شود تا نقش کار پمپ نیز در تعریف راندمان لحاظ شود (۱۹).

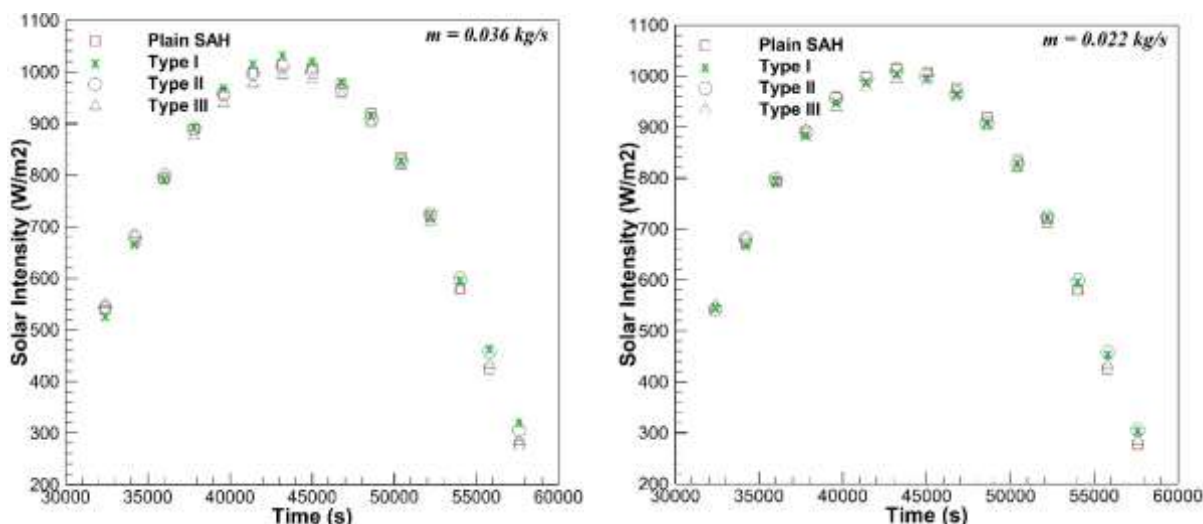
$$\eta_{eff} = \frac{(Q_u - W_p/C_f)}{IA_C} \quad (۴)$$

که در آن  $W_p$  بیانگر کار پمپ و  $C_f$  بیانگر ضریب تبدیل است. مقدار ضریب تبدیل را  $0.2$  در نظر می‌گیرند (۱۶). کار پمپ نیز از رابطه ۵ قابل محاسبه است:

$$W_p = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho\eta_{pm}} \quad (۵)$$

در این رابطه  $\Delta P$  افت فشار درون کانال را نشان می‌دهد و  $\eta_{pm}$  بیانگر راندمان موتور پمپ است که برابر  $0.85$  می‌باشد (۱۹-۲۰).

دمنده برای به چرخش درآوردن هوا درون کلکتور انرژی الکتریکی مصرف می‌کند. قیمت انرژی الکتریکی و گرمایی



شکل ۳- نمودار تغییرات مقادیر تابش رسیده به سطح کلکتور

Figure 3. Variation of solar intensities received on collector surface

درون سوراخ‌هاست که این امر منجر به اغتشاش بالای جریان می‌شود. هرچه ابعاد سوراخ‌ها کمتر باشد، اغتشاش افزایش می‌یابد. از طرفی خود موانع نیز به نسبت صفحه جاذب از مساحت قابل توجهی برخوردارند و به عنوان یک سطح گسترش‌یافته (فین) عمل می‌کنند. بدین ترتیب سطح تبادل حرارت با هوا افزایش می‌یابد و بخشی از گرما به این صورت به جریان منتقل می‌شود.

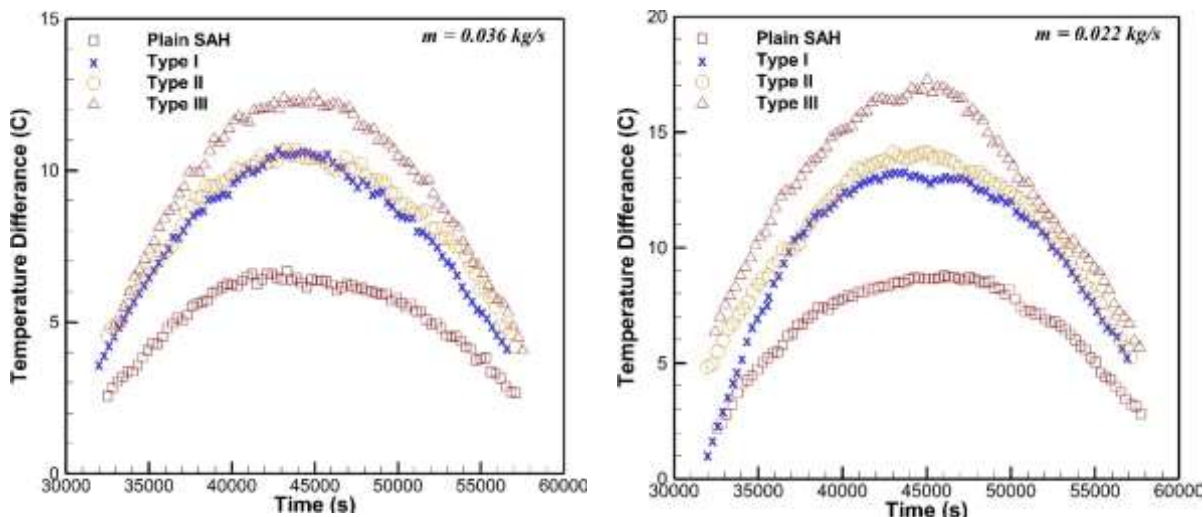
در شکل ۵ تغییرات ساعتی راندمان گرمایی کلکتور برای ۴ وضعیت مختلف نمایش داده شده است. مقادیر راندمان در روزهای دوم داده‌برداری بیشتر است. علت آن هم رابطه مستقیمی است که بین ضریب انتقال حرارت و سرعت وجود دارد. با افزایش سرعت، عدد رینولدز جریان و متعاقب آن ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه میزان گرمای انتقالی از صفحه جاذب به سیال بیشتر می‌شود و همین امر باعث افزایش راندمان سیستم می‌شود. بالاترین راندمان گرمایی کلکتور مربوط نوع سوم می‌شود که در دبی  $0.0364 \text{ kg/s}$  مقدار میانگین آن  $83\%$  است. راندمان کلکتور در این حالت با دبی  $0.0218 \text{ kg/s}$  در حدود  $68\%$  است که نشان از افزایش  $1/22$  برابری مقدار راندمان گرمایی با افزایش دبی است. همچنین راندمان گرمایی متوسط کلکتور ساده در دو دبی به ترتیب برابر  $35$  و  $47$  درصد است. مشخص می‌شود با استفاده از موانع متخلخل راندمان کلکتور به نسبت حالت ساده برای دو

در شکل ۴ نمودار اختلاف دما برای روزهای آزمایش از ساعت ۹ تا ۱۶ برای دو مقدار دبی جرمی جریان به نمایش گذاشته شده است. از این شکل‌ها بر می‌آید که بیشینه اختلاف دما نیز در ساعات ظهر، از ساعت دوازده تا سیزده رخ می‌دهد. این اختلاف دما نه تنها متأثر از تابش بیشینه است، بلکه به دمای محیط در آن ساعت نیز بستگی دارد. بیشترین اختلاف دما مربوط می‌شود به حالتی که موانع نوع سوم (موانع با سوراخ‌های به قطر  $3 \text{ cm}$ ) درون کانال قرار گرفته است. در این حالت اختلاف دما بین هوای ورودی به کلکتور و هوای خروجی از آن برای دبی  $0.0218 \text{ kg/s}$  بر ثانیه در حدود  $17^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و برای دبی  $0.0364 \text{ kg/s}$  بر ثانیه در حدود  $12^\circ\text{C}$  است. به طور کلی اختلاف دما در دبی کمتر بیشتر از حالت مربوط به دبی بالاتر است. هر چه دبی کم‌تر باشد هوا ظرفیت بیشتری برای جذب گرما و افزایش دما پیدا می‌کند. بعد از موانع نوع سوم، موانع سوراخ‌دار به قطر  $4 \text{ cm}$  (نوع ۲)، شش مانع سوراخ-دار به قطر  $5 \text{ cm}$  (نوع ۱) و در انتها کلکتور ساده قرار دارد. بیشینه اختلاف دما در کلکتور ساده در حوالی ظهر در روز اول (دبی کمتر) در حدود  $8^\circ\text{C}$  و در روز دوم (دبی بیشتر) در حدود  $6^\circ\text{C}$  است. این به آن معناست که با استفاده از موانع سوراخ‌دار در بیشترین حالت اختلاف دما در حوالی ظهر در هر دو روز تا  $2$  برابر نسبت به حالت کلکتور ساده افزایش می‌یابد. با توجه به هم‌ارتفاع بودن موانع و کانال، هوا مجبور به عبور از



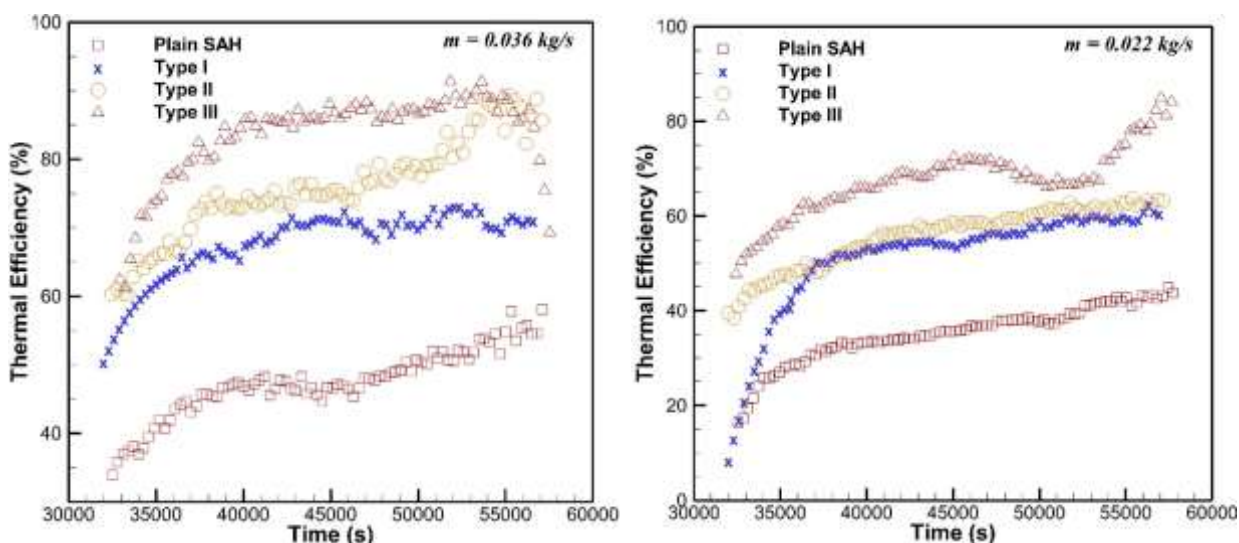
معکوسی با تابش دارد، همچنان مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار راندمان در ساعاتی رخ می‌دهد که بیشینه تابش رخ داده است. دلیل این امر احتمالاً به خاطر بیشینه اختلاف دمایی است که بین هوای خروجی و ورودی در این ساعات وجود دارد.

دبی به ترتیب ۳۵ و ۳۲ درصد افزایش داشته است. راندمان کلکتور نوع اول و دوم در دبی  $0.0218 \text{ kg/s}$  تقریباً در یک محدوده قرار دارند و با افزایش دبی است که اختلاف میان این دو حالت مطابق انتظار افزایش می‌یابد. گرچه راندمان نسبت



شکل ۴- اختلاف دما بین هوای ورودی و خروجی بر حسب زمان برای دو دبی

Figure 4. Temperature Difference between inlet and outlet air for two flowrates



شکل ۵- راندمان گرمایی کلکتور بر حسب زمان برای دو دبی مختلف

Figure 5. Thermal efficiency of collector for two flowrates

کلکتور ساده نیز می‌توان مقدار افت فشار را با کمک روابط تجربی نظیر رابطه داری-ویسباخ به دست آورد که عدد به دست آمده برای هر دو دبی کمتر از ۱ پاسکال خواهد بود و با توجه به اینکه دستگاه فشارسنج قادر به اندازه‌گیری مقادیر کمتر از یک پاسکال نیست، عدد صفر را نمایش می‌داد.

در جدول ۲ مقادیر افت فشار برای حالات مختلف نمایش داده شده است. با کمک این مقادیر و جاگذاری در رابطه ۶ می‌توان راندمان مؤثر را به دست آورد. باید توجه داشت که با توجه به طول نسبتاً کم کانال و سرعت پایین جریان هوا، مقادیر افت فشار چندان قابل توجه نیست، خصوصاً در نوع اول. در مورد

## جدول ۲- مقادیر افت فشار برای حالات مختلف بر حسب پاسکال

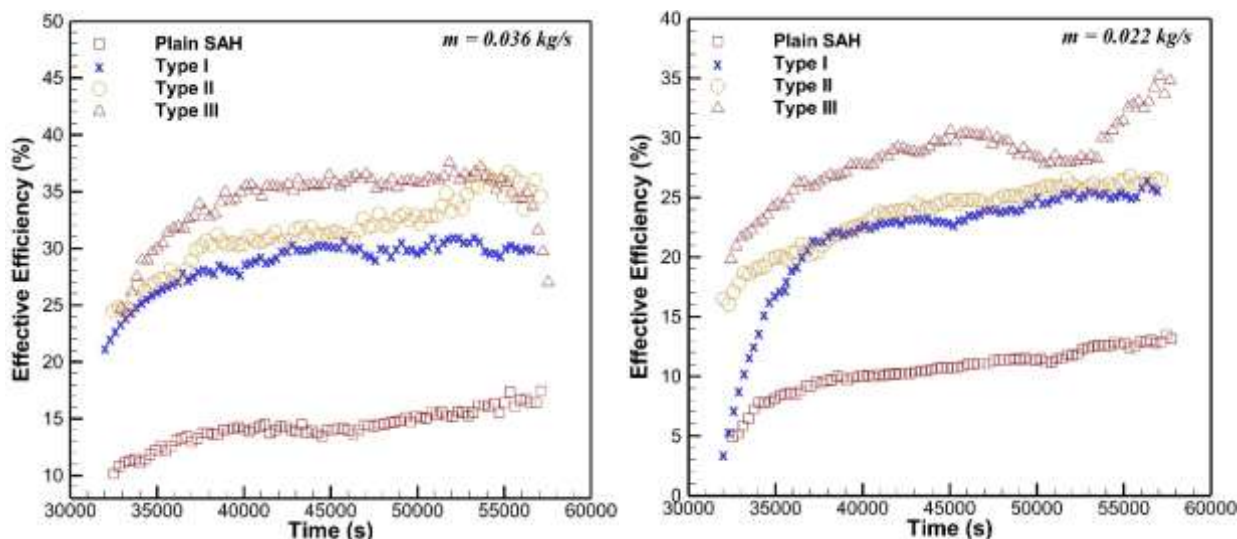
Table 2. Pressure drop values for different situations in pascal

| دبی (kg/s) | نوع اول | نوع دوم | نوع سوم | کلکتور ساده |
|------------|---------|---------|---------|-------------|
| ۰/۰۲۱۸     | ۲       | ۸       | ۱۴      | ۰           |
| ۰/۰۳۶۴     | ۳       | ۱۹      | ۲۹      | ۰           |

فشار خصوصاً در نوع اول و دوم چندان قابل ملاحظه نیست و مقدار کار ناشی از افت فشار در مقایسه با گرمای جذب شده ناچیز است و اگر ضریب برابری کار و گرما در رابطه ۶ اعمال نمی‌شد و از رابطه ۳ برای محاسبه راندمان مؤثر استفاده می‌شد، عملاً تغییر محسوسی در نمودارهای راندمان گرمایی و مؤثر ایجاد نمی‌گشت. اعمال ضریب تصحیح روی مقدار گرما باعث شده است راندمان کلکتور اصلاح شود و مقادیر آن به کمتر از نصف برای حالات مختلف برسد. متوسط راندمان مؤثر در دبی ۰/۰۳۶۴ کیلوگرم بر ثانیه برای نوع سوم ۰/۳۴/۱، نوع دوم ۳۱/۵/۵، نوع اول ۲۸/۷/۲ و کلکتور ساده ۱۴/۲/۱ است. همچنین مقادیر متوسط راندمان برای دبی ۰/۰۲۱۸ کیلوگرم بر ثانیه با حفظ همان ترتیب ۲۸/۴/۲، ۲۳/۶/۲، ۲۱/۹/۲ و ۱۰/۶/۱ است.

در شکل ۶ راندمان مؤثر کلکتور برای زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. راندمان مؤثر با در نظر گرفتن افت فشار درون کانال و کار مورد نیاز پمپ، تصویر واقعی‌تری نسبت به عملکرد کلکتور به دست می‌دهد.

با مقایسه راندمان گرمایی با راندمان مؤثر مشخص می‌شود روند یکسانی در نمودارها وجود دارد. گرچه طبق جدول ۲ مطابق انتظار افت فشار با کاهش سطح مقطع افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند، اما تأثیر گرمای دریافتی بر روی راندمان غالب است. به همین علت همچنان بهترین عملکرد در هر دو دبی متعلق به کلکتور با موانع نوع سوم است و پس از آن موانع نوع دوم و نوع اول و در انتها کلکتور ساده قرار دارد. این نکته را نیز باید در نظر داشت که با توجه به طول نسبتاً کم کلکتور، مقادیر افت



شکل ۶- راندمان مؤثر کلکتور بر حسب زمان برای دو دبی مختلف

Figure 6. Effective efficiency of collector for two flowrates

## بحث و نتیجه گیری

عملکرد یک هواگرم‌کن خورشیدی با موانع متخلخل در مسیر عبور هوا برای دو دبی مورد بررسی قرار گرفت و با عملکرد یک کلکتور ساده مقایسه شد. در تمامی حالات با افزایش دبی، راندمان افزایش پیدا کرد.

عملکرد یک هواگرم‌کن خورشیدی با موانع متخلخل در مسیر عبور هوا برای دو دبی مورد بررسی قرار گرفت و با عملکرد یک

در ارتباط با راندمان مؤثر که عملکرد پمپ را نیز در راندمان کلکتور لحاظ می‌کند، مشخص شد که با توجه به ناچیز بودن کار مربوط به افت فشار نسبت به گرمای مفید انتقالی، در تمامی حالات تفاوت قابل توجهی بین راندمان گرمایی و راندمان مؤثر وجود ندارد. اما با تغییر تعریف راندمان مؤثر و لحاظ کردن ضریب تبدیل گرما به کار درون رابطه راندمان مؤثر، تأثیر افت فشار بر روی راندمان سیستم را بهتر می‌توان تحلیل نمود. در هر صورت همانند راندمان گرمایی، بهترین عملکرد مربوط می‌شود با کلکتور به همراه موانع نوع سوم، کلکتور به همراه موانع نوع دوم، کلکتور به همراه نوع اول و در انتها کلکتور ساده قرار دارد.

مشخص شد با وجود موانع هم سطح تبادل حرارت و هم ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در نتیجه اختلاف دما در تمامی حالات نسبت به حالت ساده افزایش پیدا می‌کند. بیشترین اختلاف دما به ترتیب متعلق است به: کلکتور با موانع نوع سوم، کلکتور با موانع نوع دوم، کلکتور با موانع نوع اول و در انتها کلکتور ساده.

اختلاف دما با وجود موانع نوع سوم بیش از ۲ برابر نسبت به اختلاف دمای کلکتور ساده در دبی  $0.0218 \text{ kg/s}$  افزایش یافت.

مشخص شد متخلخل کردن موانع باعث بهبود راندمان گرمایی کلکتور نیز می‌شود. افزایش راندمان برای بهترین حالت موانع (نوع سوم) به نسبت حالت ساده برای دو دبی به ترتیب ۳۵ و ۳۲ درصد افزایش داشته است.

#### فهرست علائم

|              |                                       |             |
|--------------|---------------------------------------|-------------|
| A            | مساحت ( $\text{m}^2$ )                | زیر نویس‌ها |
| $C_f$        | ضریب تبدیل                            | c           |
| $C_p$        | ظرفیت حرارتی ویژه ( $\text{J/kg.K}$ ) | eff         |
| I            | شدت تابش خورشید ( $\text{W/m}^2$ )    | i           |
| m            | دبی جرمی ( $\text{kg/s}$ )            | o           |
| P            | فشار (Pa)                             | p           |
| $Q_u$        | گرمای مفید (W)                        | pm          |
| T            | دما (K)                               | th          |
| V            | سرعت ( $\text{m/s}$ )                 |             |
| W            | کار (W)                               |             |
| علائم یونانی |                                       |             |
| $\eta$       | راندمان                               |             |
| $\rho$       | چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )             |             |

collector through the use of obstacles: application for the drying of yellow onion. Int. J. Energy Res., Vol. 23, pp. 1083-199.

- Abene, A., Dubois, V., Le Ray, M., Ouagued, A., 2004. Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles

#### References

- <http://www.mimt.gov.ir/>
- Ahmed-Zaid, A., Messaoudi, H., Abenne, A., Le Ray, M., Desmons, J. Y., Abed, B., 1999. Experimental study of thermal performance improvement of a solar air flat plate

10. Luan, N.T., Phu, N.M., 2020. Thermohydraulic correlations and exergy analysis of a solar air heater duct with inclined baffles. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 21, 100672.
11. Sharma, N.Y., Madhwesh, N., Karanth, K.V., 2019. The Effect of Flow Obstacles of Different Shapes for Generating Turbulent Flow for Improved Performance of the Solar Air Heater. *Procedia Manufacturing* Vol. 35, pp. 1096-1101.
12. Saravanakumar, P.T., Somasundaram, D., Matheswaran, M.M., 2019. Thermal and thermo-hydraulic analysis of arc shaped rib roughened solar air heater integrated with fins and baffles. *Solar Energy*, Vol. 180, pp. 360-371.
13. Saravanakumar, P.T., Somasundaram, D., Matheswaran, M.M., 2020. Exergetic investigation and optimization of arc shaped rib roughened solar air heater integrated with fins and baffles. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 175, 115316.
14. Kumar, A. and Layek, A., 2021. Energetic and exergetic based performance evaluation of solar air heater having winglet type roughness on absorber surface. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 230, 11147.
15. Saravanan, A., Murugan, M., Sreenivasa Reddy, M., Ranjit, P.S., Elumalai, P.V., Pramad Kumar, Rama Sree, S., 2021. Thermo-hydraulic performance of a solar air heater with staggered C-shape finned absorber plate. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 168, 107068.
16. Dong, Z., Liu, P., Xiao, H., Liu, Z., Liu, W., 2021. A study on hear and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp. 15–22.
4. Handoyo, E. A., Ichsani, D., Prabowo, Sutardi, 2016. Numerical studies on the effect of delta-shaped obstacles' spacing on the heat transfer and pressure drop in v-corrugated channel of solar air heater, *Solar Energy*, Vol. 131, pp. 47-60.
5. Kulkarni, K., Afzal, A., Kim, K.Y., 2015. Multi-objective optimization of solar air heater with obstacles on absorber plate. *Solar Energy*, Vol. 114, pp. 364–377.
6. Alam, T., Kim, M.H., 2016. Numerical study on thermal hydraulic performance improvement in solar air heater duct with semi ellipse shaped obstacles. *Energy*, Vol. 112, pp. 588-598.
7. Kumar, A., Kumar, R., Maithani, R., Chauhan, R., Sethi, M., Kumari, A., Kumar, S., Kumar, S., 2017. Correlation development for Nusselt number and friction factor of a multiple type V-pattern dimpled obstacles solar air passage. *Renewable Energy*, Vol. 109, pp. 461-479.
8. Nadda, R., Kumar, A., Maithani, R., 2017. Developing heat transfer and friction loss in an impingement jets solar air heater with multiple arc protrusion obstacles. *Solar Energy*, Vol. 158, pp. 117–131.
9. Bensaci, C., Moumami, A., [Flor, F.](#), [Jara, E.](#), [Rincon-Casado, A.](#), [Ruiz-Pardo, A.](#), 2020. Numerical and experimental study of the heat transfer and hydraulic performance of solar air heaters with different baffle positions. *Renewable Energy*, Vol. 155, pp. 1231-1244.

- evaluation and parametric studies of single pass solar air heater with fins and baffles attached over the absorber plate, *Energy*, Vol. 57, pp. 741-750, 2013.
20. MK. Gupta, SC. Kaushik. Performance evaluation of solar air heater for various artificial roughness geometries based on energy, effective and exergy efficiencies. *Renew Energy*, Vol. 34, pp. 465-476, 2009.
21. Ansari, M. and Bazargan, M., 2018. Optimization of Flat Plate Solar Air Heaters with Ribbed Surfaces. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136: pp. 356-363.
- transfer enhancement for solar air heaters with ripple surface. *Renewable Energy*, Vol. 172, pp. 477-487.
17. Sureandhar, G., Srinivasan, G., Muthkumar, P., Senthilmurugan, S., 2021. Performance Analysis of arc rib fin embedded in a solar air heater. *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 23, 100891.
18. KhoshAkhlagh, F., Molaei Pardeh, A., Abadijoo, M.M., 2014. Analysis and zoning of climatic potentials of Khuzestan province for the use of solar energy. *Nivar*, Vol. 92. (In Persian)
19. K. Mohammadi, M. Sabzpooshani, Comprehensive performance