

Performance Evaluation of New Combination External Recycle Flow and Arc-shaped Wire as Artificial Roughness of Solar Air Heater

Mortza Heydar¹, Majid Sabzpooshani^{2*}

¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
mortezahaydar10@gmail.com

²Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
spooshan@kashanu.ac.ir

Keywords:

air heater collector
solar energy
artificial roughness as arc-shaped wire
external recycle
energy and exergy efficiencies

Abstract: The challenge of energy and environmental pollution has forced researchers to make more use of solar energy. In the present study, a new solar air heater collector system with a synthetic combination of arc-shaped wire roughness and external recycle of airflow has been presented, and its performance has been evaluated in different conditions. Modeling is performed using energy conservation equations for different parts of the collector and is solved by a semi-analytical method. The validation of the present results indicates the accuracy of the method used. The results showed that the new hybrid system effectively increased energy and exergy efficiencies at mass flows less than about 0.04 kg/s. Also, in a constant roughness condition and at low mass flow rates, increasing the flow recycle ratio to about 3, increased the collector performance. However, in high flow rates and recycle ratios, exergy efficiency was reduced sharply due to high pressure drop, despite an increase in energy efficiency. Thus, it was less than the simple collector system. Increasing the intensity of solar radiation increased energy and exergy efficiencies in the new system. Examination of the geometric parameters of artificial roughness showed that an increase in the diameter of the curved wire improved the performance of the new system while changing the curvature angle of the wire had little effect.

Original Research Article

Paper History:

Received: 21/08/2021

Accepted: 28/11/2021

How to cite this article: Heydar, M., Sabzpooshani, M., "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. <https://doi.org/10.22052/jeem.2023.113708>
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

One way to utilize thermal energy of sun is through solar air heaters. In this type of collectors, the amount of solar energy gain is

low. In this paper, the combination of two methods is applied simultaneously to enhance the rate of heat transfer. These two methods include arc-shaped wire, as artificial

roughness, and the recycling of air flow. Thermal performance evaluation has been studied using different parameters such as outlet air temperature, energy, and exergy efficiencies.

Materials and Methods

The air heater considered consists of a flat glass cover and a flat absorber plate with fins and baffles attached. The combination of parallel flat absorber plate and glass cover makes a channel where the flowing air through the channel is heated by the absorbed solar radiation on the absorber plate. The bottom side of the absorber plate is well insulated. The one-dimensional mathematical formulation in the flow direction in steady state condition has been considered. The energy balance for the considered control volumes of upper and lower glass covers, the absorber plate, and air flow are depicted; then, with a combination of equations, the semi-analytical solution has been applied to solve the equations. Also, the general exergy balance for the solar air heater was deployed.

Results

In the present study, a new solar air heater collector system with a synthetic combination of arc-shaped wire roughness and external recycle of airflow was presented, and its performance was evaluated in different conditions. The most important results and findings of this research can be categorized as follows:

1. Solar air heater collector system with the proposed new combination, including external recycle and considering artificial roughness of arc-shaped wire type, in mass flows of less than 0.04 kg/s, effectively increased energy and exergy efficiencies, and, thus, it could be considered a suitable selection.
2. With increasing solar radiation intensity, the efficiency of the proposed hybrid system was improved in all studied mass flows.
3. Increasing the recycle ratio of more than about 3 (according to the parameters

considered in the present study) did not necessarily improve the performance of the proposed system, and, even at high mass flow rates, it could be less than the performance of the simple solar collector system. However, despite an increase in energy efficiency in these cases, it could lead to negative exergy efficiencies.

4. In the new hybrid system, the diameter of the arc-shaped wire attached to the absorber plate had a great effect on the performance of the proposed system, while its angle of curvature had little effect.

Discussion and Conclusion

In the present study, a new solar air heater collector system with a synthetic combination of arc-shaped wire roughness and external recycle of airflow has been presented, and its performance has been evaluated in different conditions. Modeling was performed using energy conservation equations for different parts of the collector and was solved by a semi-analytical method. The validation of the present results indicated the accuracy of the method used. The present results showed that the new hybrid system effectively increased energy and exergy efficiencies at mass flows less than about 0.04 kg/s. Also, in a constant roughness condition and at low mass flow rates, an increase in the flow recycle ratio to about 3 increased the collector performance. However, exergy efficiency was reduced sharply in high flow rates and recycle ratios, due to high pressure drop, despite an increase in energy efficiency. Thus, it was less than the simple collector system. Increasing the intensity of solar radiation increased energy and exergy efficiencies in the new system. Examination of the geometric parameters of artificial roughness showed that increasing the diameter of the curved wire improved the performance of the new system, while the changing of the curvature angle of the wire had little effect.

بررسی عملکرد کلکتور هواگرمکن خورشیدی جدید با ترکیب بازچرخش خارجی جریان و زبری مصنوعی از نوع میله منحنی شکل

مرتضی حیدر^۱، مجید سبزویشانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mortezahaydar10@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

spooshan@kashanu.ac.ir

واژه‌های کلیدی:
کلکتور هواگرمکن
انرژی خورشیدی
زبری مصنوعی میله منحنی شکل
بازچرخش خارجی
راندمان‌های انرژی و آگرزوری

چکیده: چالش انرژی و آلودگی محیط زیست، محققان را به استفاده بیشتر از انرژی خورشیدی وادار نموده است. در تحقیق حاضر، یک سیستم نوین کلکتور هواگرمکن خورشیدی با ترکیب زبری مصنوعی میله منحنی شکل و بازچرخش خارجی جریان هوا ارائه و ارزیابی عملکرد آن در شرایط مختلف انجام شده است. مدل‌سازی با استفاده از معادلات بقای انرژی برای بخش‌های مختلف کلکتور انجام و با یک روش نیمه‌تحلیلی حل شده‌اند. صحت‌سنجی نتایج حاضر بیانگر دقت مناسب روش به کار برده شده است. نتایج حاضر نشان داد که سیستم ترکیبی جدید به طور مؤثری راندمان‌های انرژی و آگرزوری را در دبی‌های جرمی کمتر از حدود 0.04 kg/s را افزایش می‌دهد. همچنین در شرایط زبری ثابت و در دبی‌های کم، افزایش نسبت بازچرخش جریان تا حدود ۳، باعث افزایش عملکرد کلکتور شده اما در دبی‌های بالاتر از 0.06 kg/s و نسبت‌های بازچرخش بیشتر از ۳، به سبب افت فشار زیاد، به رغم افزایش راندمان انرژی، راندمان آگرزوری به شدت کاهش پیدا کرده، به طوری که از حالت سیستم کلکتور ساده نیز کمتر می‌شود. افزایش شدت تابش خورشیدی باعث افزایش راندمان‌های انرژی و آگرزوری در سیستم جدید شده است. بررسی پارامترهای هندسی زبری مصنوعی، نشان داد که افزایش قطر میله منحنی شکل، باعث بهبود عملکرد شده درحالی که تغییر زاویه انحنا میله تأثیر چندانی ندارد.

مقاله علمی پژوهشی

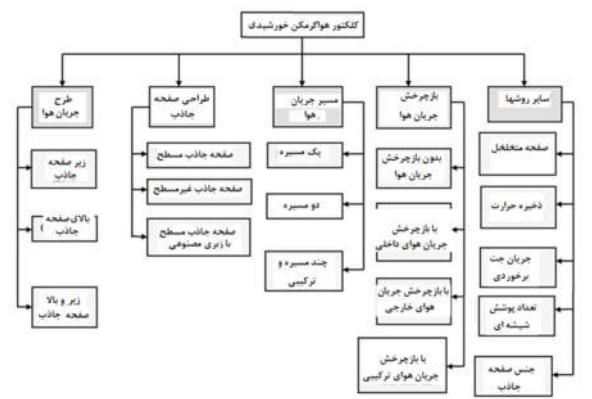
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

۱. مقدمه

انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است و مزیت اصلی آن در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر، قابلیت بهره‌برداری در بیشتر مناطق کره زمین می‌باشد. از سیستم‌های انرژی خورشیدی می‌توان برای تأمین گرما، آب گرم، الکتریسیته و حتی سرمایه‌گذاری در منازل مسکونی، مراکز تجاری و صنعتی استفاده کرد [۱]. سیستم‌های گرمایشی خورشیدی یکی از پرکاربردترین روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی هستند. یکی از مهم‌ترین روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی، گرمایش جریان هوا توسط کلکتورهای هواگرمن است که در صنایع مختلف از قبیل خشک کردن محصولات کشاورزی، گرمایش و یا پیش‌گرمایش هوای فضاها، مسکونی، گرمایش هوای مورد نیاز در احتراق است. تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که انتقال حرارت و کارایی کلکتور توسط سه عامل شامل دبی جریان هوا، طراحی کانال جریان هوا و هندسه سطح جاذب کنترل می‌شود. برخی کاستی‌ها در کلکتورهای هواگرمن، باعث محدود شدن عملکرد حرارتی آن‌ها شده است. برای نمونه، خواص حرارتی نامناسب هوا برای کاربرد در کلکتورها مانند چگالی کم، ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی کم و نیز کم بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین صفحه جاذب و جریان سیال باعث کمتر شدن عملکرد حرارتی سیستم می‌شود [۱].

دسته‌بندی‌های مختلفی طبقه‌بندی نمود. در شکل (۱) دسته‌بندی کلکتورهای هواگرمن خورشیدی براساس مطالعات محققان قبل نشان داده شده است.



شکل (۱): دسته‌بندی روش‌های افزایش عملکرد کلکتورهای هواگرمن خورشیدی

یکی از مهم‌ترین روش‌های افزایش دهنده میزان انتقال حرارت، سیستم بازچرخش جریان است. در این سیستم‌ها، بخشی از هوای خروجی به یک کانال ثانوی انتقال داده شده و در مجاورت با کانال اصلی، مجدداً گرم شده و سپس وارد بخش ورودی کانال اصلی می‌شود. از جمله تحقیقات انجام‌شده در این زمینه، کارپه و همکاران [۲] است که به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری به بررسی عملکرد گرمایی یک کلکتور هواگرمن با دو کانال جهت عبور هوا، یک کانال در بالای صفحه جاذب و دیگری در پایین صفحه جاذب پرداختند. کلکتور در نظر گرفته‌شده، دارای دو پوشش شیشه‌ای برای کاهش افت‌های حرارتی از صفحه جاذب و همچنین پره‌های نصب‌شده در بالا و پایین صفحه جاذب بود. عملکرد این کلکتور برحسب راندمان انرژی ارزیابی شد و نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی تئوری مقایسه شدند که حاکی از همخوانی کاملاً خوبی بین نتایج بود. یه و هو [۳] با استفاده از اضافه کردن یک کانال کاملاً عایق به پایین کانال قرارگرفته در زیر صفحه جاذب، در یک کلکتور هواگرمن تک‌کانال، اثر بازچرخش جریان هوای خروجی از کانال عایق به قسمت ورودی کانالی اصلی را بررسی نمودند. در این تحقیق عملکرد گرمایی کلکتور برحسب دمای هوای خروجی و راندمان انرژی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها در تحقیق خود، تأثیر نسبت بازچرخش جریان از صفر تا پنج و نیز دبی‌های جرمی مختلف را در نظر گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که با افزایش نسبت بازچرخش، به‌خصوص در دبی‌های جرمی کم و نیز دماهای ورودی بالا، عملکرد کلکتور بهبود می‌یابد.

گونه‌های دیگر از سیستم‌های افزایش دهنده میزان انتقال حرارت در

همان‌گونه که اشاره شد، هدف اصلی روش‌ها، بالا بردن مقدار انتقال حرارت از صفحه جاذب و در نتیجه، افزایش عملکرد گرمایی کلکتورهای هواگرمن است. در مقابل، اثر منفی و نامطلوب این روش‌ها، افزایش افت فشار حاصل از افت‌های اصطکاکی است که منجر به افزایش کار مورد نیاز فن (دمنده هوا) می‌گردد. این موضوع، فرضیه ارزان بودن و کم‌هزینه بودن کلکتورهای هواگرمن را تا حدودی مورد تأثیر قرار می‌دهد. از این رو در طراحی کلکتور که شامل ابعاد هندسی کلکتور، ابعاد کانال هوای عبوری و پارامترهای سیستم افزایش دهنده انتقال حرارت می‌شود، باید هر دو هدف دستیابی به مقدار انتقال حرارت بالاتر و افت‌های اصطکاکی پایین‌تر در نظر گرفته شود [۱].

محققان روش‌های مختلفی را برای افزایش عملکرد کلکتور هواگرمن ارائه داده‌اند که از جمله به بازچرخش جریان هوا به صورت داخلی و خارجی و همچنین اثر ترکیبی بازچرخش جریان با سطوح جاذب غیرتخت و یا دارای زبری مصنوعی می‌توان اشاره کرد [۱]. مدل‌های مختلفی از کلکتورهای هواگرمن خورشیدی ارائه شده است. براساس پارامترهای مختلف، این مدل‌ها را می‌توان در

هواگر مکن‌های خورشیدی، سطوح زیر مصنوعی است [۴]. سطوح زیر مصنوعی به دسته‌های مختلفی از نظر شکل ظاهری تقسیم می‌گردند و در واقع با ایجاد اغتشاش در جریان، عملکرد گرمایی دستگاه را بالا می‌برند و مانند سیستم‌های قبلی نقطه منفی آن‌ها افزایش میزان افت فشار در طول مجراست که به دنبال آن باعث افزایش میزان توان الکتریکی لازم برای پمپاژ جریان می‌گردد. پراساد و سانی [۵] تأثیر پارامترهای مختلف زیری را برای سطح زیر مصنوعی را که مانند یک سری سیم نازک دایروی بر روی صفحه جاذب قرار گرفتند، بر روی عملکرد گرمایی و میزان افت فشار بررسی کردند. بیشترین میزان افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به ترتیب ۳۸٫۲ و ۳۵٫۴ مرتبه بیشتر نسبت به سطح صاف به دست آمد. از جمله تحقیقات دیگر می‌توان به کار چائوب و همکاران [۶] اشاره کرد که با نصب میله‌های نازک فلزی روی صفحه جاذب، عملکرد کلکتور را افزایش دادند. کاروا و جوهان [۷] با استفاده از سیم‌های نازک فلزی به صورت V شکل روی صفحه جاذب، عملکرد حرارتی کلکتور را بررسی کردند. اهاروال و همکاران [۸] نیز با استفاده از سیم‌های نازک فلزی که به صورت مورب و منقطع روی صفحه جاذب نصب شده بود، مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار ایجاد شده در کلکتور هواگر مکن خورشیدی را مورد تحقیق قرار دادند. سانی و سانی [۹] با استفاده از زیری مصنوعی از نوع میله‌های نازک فلزی و به شکل منحنی که روی صفحه جاذب نصب نمودند، به ارزیابی عملکرد کلکتور هواگر مکن خورشیدی پرداختند و بر اساس نتایج تجربی به دست آمده، روابطی برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند. مشخصه اصلی نتایج آن‌ها بیانگر افزایش کمتر ضریب اصطکاک همراه با افزایش کمتر عدد ناسلت، در مقایسه با چندین نوع از زیری‌های مصنوعی دیگر محققان بود.

ترکیب سیستم بازچرخش با سایر تکنیک‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه، یه و هو [۱۰] به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی به بررسی تأثیر بازگرداننده خارجی جریان بر روی عملکرد گرمایی هواگر مکن خورشیدی همراه با فین و بافل پرداختند. در این کار تأثیر وجود بازگرداننده و بافل بر روی افزایش میزان افت فشار در طول مجرا نیز بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده این بود که با افزایش ضریب بازگرداننده از صفر به دو میزان عملکرد گرمایی در هر سه حالت بدون وجود فین، همراه با فین و همراه با فین و بافل افزایش یافته است. یه و هو [۱۱] به بررسی تأثیر پره در کلکتور هواگر مکن خورشیدی دوکاناله با بازچرخش جریان پرداختند و نشان دادند که اضافه نمودن پره می‌تواند عملکرد کلکتور را بهبود بخشد.

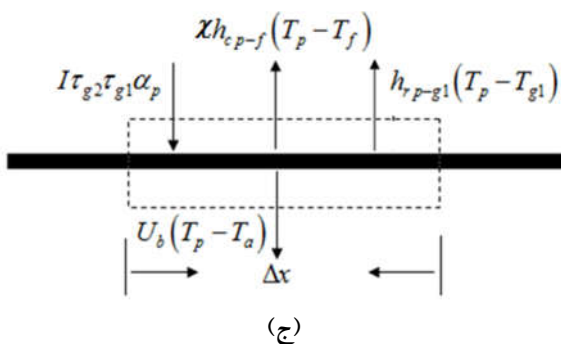
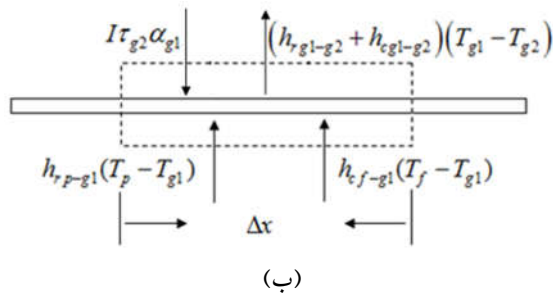
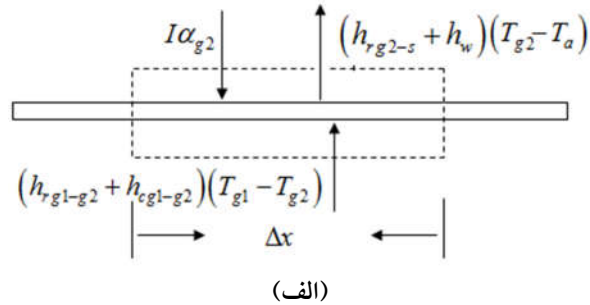
محمدی و سبزوستانی [۱۲] به بررسی عملکرد یک کلکتور هوا گرم با بازچرخش خارجی جریان و به همراه پره و بافل پرداختند. آن‌ها در این کار نشان دادند که ترکیب سیستم بازچرخش جریان با پره و بافل به راحتی می‌تواند راندمان انرژی و آگرژی سیستم ترکیبی را نسبت به سیستم ساده سستی به نحو بسیار مطلوبی افزایش دهد. احمدخانی و همکاران [۱۳] به ارزیابی عملکرد بازچرخش جریان خارجی هوا به صورت جریان مخالف و جریان موافق روی کلکتور هواگر مکن خورشیدی دومسیره پرداختند. علاوه بر آن، آن‌ها این سیستم را با قرار دادن یک ماتریس از محیط متخلخل در مسیر جریان، سیستم هواگر مکن را به صورت ترکیبی مورد تحقیق قرار دادند و بیان نمودند که راندمان کلکتور تا حدود ۸۰ درصد می‌تواند بهبود یابد. سانی و ورما [۱۴] با استفاده از زیری‌های مصنوعی متصل به صفحه جاذبه به شکل برآمدگی‌های نیم‌کروی به بررسی عملکرد کلکتور هواگر مکن خورشیدی پرداختند و برای سیستم مورد بررسی‌شان روابطی برای محاسبه ضریب عدد ناسلت ارائه دادند. گویتا و کوشیک [۱۵] مروری بر تحقیقات انجام شده بر اساس ساختارهای متفاوت زیری‌های مصنوعی را انجام داد، آن‌ها را دسته‌بندی کردند. از جمله تحقیقات اخیر می‌توان به تحقیق رامیندر و همکاران [۱۶] اشاره نمود که با استفاده از شبکه‌هایی از سیم‌های نازک روی صفحه جاذب، عملکرد کلکتور هواگر مکن خورشیدی را مورد تحلیل قرار دادند.

مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که با استفاده از ترکیب برخی روش‌های مختلف ارائه شده، می‌توان برای افزایش راندمان کلکتورهای هواگر مکن خورشیدی اقدام نمود. ترکیب روش بازچرخش خارجی جریان هوا با برخی از روش‌های دیگر مانند پره انجام شده، اما تاکنون ترکیب این روش با زیری مصنوعی از نوع میله‌های مورب نصب شده روی صفحه جاذب که توسط سانی و سانی [۹] پیشنهاد داده شده، مطالعه نشده است. تخمین زده می‌شود که ترکیب این دو روش، بتواند عملکرد کلکتور را بهبود بخشد اما وجود افت فشارهای در مسیر جریان هوا و اثرات نامطلوب آن، می‌تواند باعث کاهش راندمان شود. لذا در این تحقیق، با ترکیب این دو روش و با استفاده از تحلیل راندمان انرژی و راندمان آگرژی عملکرد کلکتور هواگر مکن خورشیدی جدید، در شرایط مختلف محیطی از قبیل شدت تابش خورشیدی و دبی جرمی و نیز شرایط مختلف هندسی مانند نسبت بازچرخش و تغییر ابعاد مربوط به زیری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

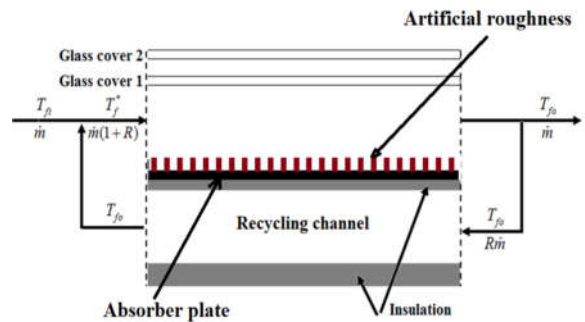
۲. بیان مسئله

با اضافه کردن یک کانال عایق به پایین کانال اصلی در کلکتور

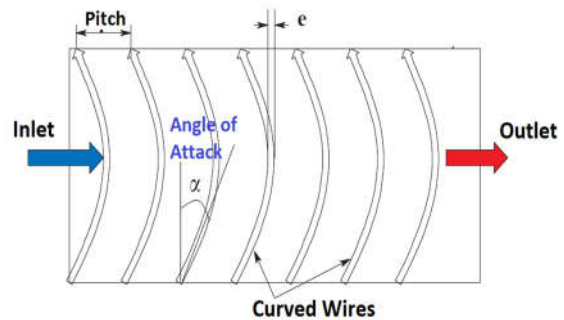
زیر استفاده شده است: ۱. ظرفیت حرارتی ویژه و سایر خواص تابشی از قبیل ضریب جذب و یا ضریب صدور برای پوشش‌های شیشه‌ای و صفحه جذب ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ ۲. از نفوذ هوا از لبه‌های اطراف کلکتور صرف نظر می‌شود؛ ۳. جریان هوا انرژی تابشی خورشید را جذب نمی‌کند؛ ۴. تغییرات دمای هوا، صفحه جذب و پوشش‌های شیشه‌ای تنها در راستای جریان هوا تغییر می‌کنند و لذا مسئله به صورت یک بعدی حل می‌شود. با توجه به فیزیک جریان در کلکتور هواگرمن خورشیدی، جهت غالب جریان در راستای طولی کلکتور است و راستای عرضی نیز به اندازه کافی زیاد است که از اثرات دیوارهای جانبی کلکتور روی جریان بتوان صرف نظر کرد. لذا فرض جریان یک بعدی کاملاً منطقی است. البته این فرض در تحقیقات محققان قبلی نیز به کرات مورد استفاده قرار گرفته و تأیید شده است [۱۵]. حجم کنترل‌های در نظر گرفته شده برای بخش‌های مختلف کلکتور خورشیدی به تفکیک در شکل‌های (۴) نشان داده شده و براساس پارامترهای معرفی شده در این شکل، موازنه انرژی برای پوشش شیشه‌ای دوم (بالا)، پوشش شیشه‌ای اول، صفحه جذب و جریان هوا به ترتیب در روابط (۱) تا (۴) ارائه شده است.



هواگرمن یک مسیره و دارای دو پوشش شیشه‌ای، جریان خروجی به ابتدای کانال اصلی بازچرخش پیدا می‌کند. طرح‌واره کلکتور هواگرمن با بازچرخش خارجی جریان، از نمای جانبی در شکل (۲) نشان داده شده است. اندیس R در این شکل نشان‌دهنده نسبت بازچرخش جریان است. شایان ذکر است که اگر R برابر با صفر در نظر گرفته شود، با توجه به عایق بودن کانال پایین، این کلکتور به کلکتور با دو پوشش شیشه‌ای یک مسیره تبدیل می‌گردد.



شکل (۲): طرح‌واره کلکتور هواگرمن خورشیدی پیشنهادی با ترکیب بازچرخش خارجی و زبری مصنوعی



شکل (۳): نمای از بالا صفحه جذب و میله‌های نازک منحنی متصل به آن به عنوان زبری مصنوعی

زبری مصنوعی مورد استفاده در سیستم ترکیبی پیشنهادی، میله‌های نازک منحنی نصب شده روی صفحه جذب می‌باشد که توسط سانی و سانی [۹] پیشنهاد و در شکل (۳) داده شده است. پارامترهای هندسی مربوط به این زبری، از جمله موارد مؤثر در عملکرد کلکتورند که در تحقیق حاضر، اثر آن‌ها نیز در سیستم جدید پیشنهادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳. معادلات اساسی

برای مدل نمودن سیستم ترکیبی جدید، با فرض جریان دائم و ثابت بودن خواص هوا، از معادلات بقای انرژی برای بخش‌های مختلف کلکتور خورشیدی استفاده می‌شود. گفتنی است که با توجه به توسعه معادلات یک بعدی برای هندسه جدید، استفاده از نرم‌افزارهای تجاری برای تحلیل حاضر مقدور نیست. بدین منظور از فرضیات ساده‌کننده

دیفرانسیل مربوط به جریان هوا (۴)، معادله (۸) حاصل خواهد شد که با شرط مرزی داده شده قابل حل است.

$$\frac{dT_f}{dx} = P_1 + P_2 T_f + P_3 T_a \quad (۸)$$

$$\text{At } x=0, T_f = T_f^R; \text{ at } x=L, T_f = T_{fo} \quad (۹)$$

که در آن دمای ورودی به بخش کانال فوقانی بعد از انجام بازچرخش جریان است. برای اینکه دمای T_f^R محاسبه شود، از موازنه انرژی در ورودی کانال استفاده شده است:

$$\dot{m}C_p T_{fi} + \dot{m}RC_p T_{fo} = \dot{m}(1+R)C_p T_f^R \quad (۱۰)$$

$$T_f^R = \frac{T_{fi} + RT_{fo}}{(1+R)} \quad (۱۱)$$

بعد از حل معادله دیفرانسیلی (۹) مربوط به جریان هوا، توزیع دمای جریان هوا برحسب طول کانال از رابطه (۱۲) قابل محاسبه است:

$$T_f(x) = \left[\left(T_f^R + \frac{A}{P_2} \right) \exp(P_2 x) \right] - \frac{A}{P_2} \quad (۱۲)$$

که در آن، $A = P_1 + P_3 T_a$ است.

با قرار دادن $T_f|_{x=L} = T_{fo}$ و نیز استفاده از رابطه (۱۱) در معادله (۱۲)، به راحتی می توان دمای هوای خروجی از کلکتور را به دست آورد:

$$T_{fo} = \frac{T_{fi}}{(1+R)D} \exp(P_2 L) + \frac{A}{DP_2} [\exp(P_2 L) - 1] \quad (۱۳)$$

$$D = \left[1 - \frac{R}{1+R} \exp(P_2 L) \right]$$

برای محاسبه دمای متوسط هوا که در محاسبه خواص هوا و ضرایب انتقال حرارت جابه جایی مورد نیاز خواهد بود، با داشتن رابطه مربوط به توزیع دمای هوا از رابطه (۱۴) استفاده می شود:

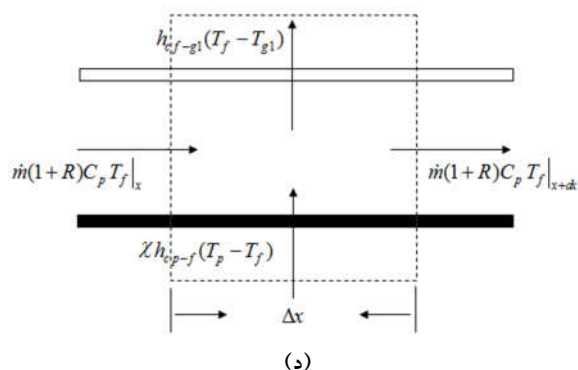
$$T_{fm} = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(x) dx = \frac{1}{P_2 L} \left(T_f^R + \frac{A}{P_2} \right) [\exp(P_2 L) - 1] - \frac{A}{P_2} \quad (۱۴)$$

۴. روابط مربوط به ضرایب انتقال حرارت و افت فشار

در ترکیب بندی کلکتور مورد تحقیق و به منظور کاهش افت های حرارتی، قسمت پایینی صفحه جاذب با ضخامت مشخصی عایق بندی شده است. ضریب افت حرارتی از سمت پایین کلکتور برابر با نسبت رسانش گرمایی عایق به ضخامت عایق است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U_b = k_{ins} / \delta_{ins} \quad (۱۵)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه جایی ناشی از باد در



شکل (۴): حجم کنترل برای بخش های مختلف کلکتور: الف. پوشش شیشه ای بالایی؛ ب. پوشش شیشه ای پایینی؛ ج. صفحه جاذب؛ د. جریان هوا روی صفحه جاذب

(۱)

$$I\alpha_{g2} + (h_{r,g1-g2} + h_{c,g1-g2})(T_{g1} - T_{g2}) = (h_{r,g-s} + h_w)(T_{g2} - T_a) \quad (۲)$$

$$I\tau_{g2}\alpha_{g1} + h_{r,p-g1}(T_p - T_{g1}) + h_{c,f-g1}(T_f - T_{g1}) = (h_{r,g1-g2} + h_{c,g1-g2})(T_{g1} - T_{g2}) \quad (۳)$$

$$I\tau_{g1}\tau_{g2}\alpha_p = \chi h_{c,p-f}(T_p - T_f) + h_{r,p-g1}(T_p - T_{g1}) + U_b(T_p - T_a) \quad (۴)$$

$$\frac{\dot{m}(1+R)C_p}{B} \frac{dT_f}{dx} = \chi h_{c,p-f}(T_p - T_f) - h_{c,f-g1}(T_f - T_{g1})$$

گفتنی است که در معادله (۴)، با توجه به دائم بودن جریان، حجم کنترل نشان داده شده برای جریان داخل کانال هوا و قانون بقای جرم، دبی جرمی ورودی با خروجی برابر بوده و از این مطلب در معادله بقای انرژی استفاده شده است. معادلات (۱) تا (۳) را می توان با یکدیگر ترکیب نمود و دمای بخش های مختلف کلکتور شامل پوشش های شیشه ای و دمای صفحه جاذب را برحسب دمای جریان هوا T_f و دمای محیط T_a به صورت زیر به دست آورد:

$$T_{g1} = M_5 + M_6 T_f + M_7 T_a \quad (۵)$$

$$T_{g2} = O_1 + O_2 T_f + O_3 T_a \quad (۶)$$

$$T_p = N_1 + N_2 T_f + N_3 T_a \quad (۷)$$

ضرایب داده شده (M_i, O_i, N_i)، شامل دماهای مجهول پوشش شیشه ای اول و دوم، دمای صفحه جاذب و نیز ضرایب انتقال حرارت جابه جایی و تابشی بخش های مختلف اند و لذا در حقیقت، این روابط به صورت معادلات غیرخطی هستند. با ترکیب این روابط در معادله

که توسط سانی و سانی [۹] ارائه شده است، استفاده می‌شود:

$$Nu_{c,p-f} = 0.001047Re^{1.3186} \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.3772} \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.1198} \quad (25)$$

افت فشار ΔP ایجادشده به واسطه اثرات اصطکاکی در طول کانال هوای عبوری و همچنین کانال هوای بازچرخشی، از طریق رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$\Delta P = \frac{4fLV^2\rho_f}{2D_h} \quad (26)$$

که در آن، f ضریب اصطکاک است. برای یک کانال ساده در رژیم جریان آرام و مغشوش به ترتیب، با رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) به دست می‌آیند:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (27)$$

$$f = 0.0791(Re)^{-0.25} \quad (28)$$

در شرایطی که زبری مصنوعی از نوع میله نازک منحنی شکل به صفحه جاذب متصل باشد، برآورد مقدار ضریب اصطکاک از رابطه معرفی شده توسط سانی و سانی [۹] انجام می‌شود:

$$f = 0.14408Re^{-0.17103} \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.1765} \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0.1185} \quad (29)$$

شایان ذکر است که برای محاسبه افت فشار در سیستم ترکیبی حاضر، افت فشار در کانال بالا که کانال اصلی است و نیز در کانال زیرین که مربوط به بازچرخش جریان است، محاسبه و در نظر گرفته می‌شود.

W_p که نشان‌دهنده مقدار کار مورد نیاز دمنده هواست، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_p = \dot{m}\Delta P / (\rho\eta_{pm}) \quad (30)$$

η_{pm} راندمان دمنده هواست و در این تحقیق برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. اگر دماهای ورودی و خروجی هوا مشخص باشد، رابطه (۳۱) مقدار انرژی مفید Q_u جذب شده توسط کلکتور هواگرمن را ارائه می‌کند:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (31)$$

راندمان انرژی η کلکتور را می‌توان با تقسیم رابطه به دست آمده برای انرژی مفید بر حاصل ضرب شار تشعشعی خورشیدی در مساحت کلکتور به دست آورد؛ از این رو η برابر خواهد بود با [۱۲]:

$$\eta = \frac{Q_u}{IA_p} = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{IA_p} \quad (32)$$

اگر زبری حداکثر انرژی قابل حصول توسط سیستم است که

بالای سطح پوشش شیشه‌ای، از رابطه (۱۶) استفاده شده است [۱]:

$$h_w = 2.8 + 3.0V \quad (16)$$

ضرایب انتقال حرارت تشعشعی از پوشش شیشه‌ای بالایی به محیط و از پوشش شیشه‌ای پایینی به بالایی به ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) به دست می‌آیند:

$$h_{r,g2-s} = \varepsilon_g \sigma (T_{g2m}^2 + T_s^2) (T_{g2m} + T_s) \quad (17)$$

$$h_{r,g1-g2} = \frac{\sigma (T_{g1m}^2 + T_{g2m}^2) (T_{g1m} + T_{g2m})}{(1/\varepsilon_{g1}) + (1/\varepsilon_{g2}) - 1} \quad (18)$$

ضریب انتقال حرارت تشعشعی از صفحه جاذب به پوشش شیشه‌ای پایینی با رابطه (۱۹) قابل محاسبه است:

$$h_{r,p-g1} = \frac{\sigma (T_{pm}^2 + T_{g1m}^2) (T_{pm} + T_{g1m})}{(1/\varepsilon_p) + (1/\varepsilon_{g1}) - 1} \quad (19)$$

برای انتقال حرارت جابه‌جایی بین دو پوشش شیشه‌ای از رابطه تجربی (۲۰) استفاده شده است:

$$h_{c,g1-g2} = 1.25 (T_{g1m} - T_{g2m})^{0.25} \quad (20)$$

نوع رژیم جریان در حالت کلکتور ساده (بدون زبری) با توجه به عدد رینولدز مشخص می‌شود که هم شامل رژیم آرام و هم مغشوش است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای هوای عبوری از کانال در حالت بدون زبری مصنوعی، در رژیم جریان آرام و مغشوش با توجه به عدد رینولدز که براساس قطر هیدرولیکی محاسبه می‌شود، به ترتیب از روابط (۲۱) و (۲۲) زیر به دست می‌آیند [۱۰]:

$$Nu = \frac{h_c D_h}{k_f} = 4.4 + \frac{0.00398 (0.7 Re D_h / L)^{1.66}}{1 + 0.0114 (0.7 Re D_h / L)^{1.12}} \quad (21)$$

$$Nu = \frac{h_c D_h}{k_f} = (0.0158 Re^{0.8}) \quad (22)$$

در هر دو رابطه (۲۱) و (۲۲)، D_h بیانگر قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد که طبق تعریف برابر است با:

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4HB}{2(H+B)} = \frac{2HB}{(H+B)} \quad (23)$$

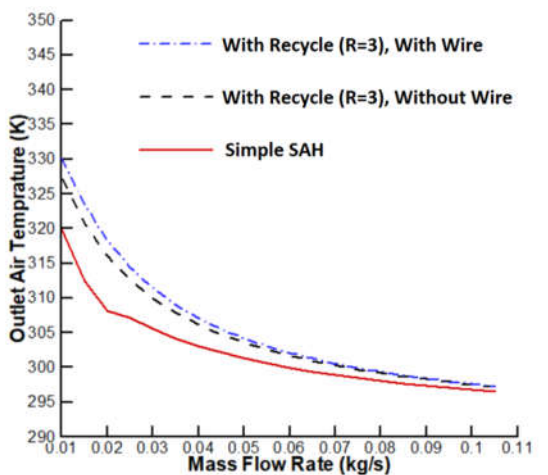
همان‌طور که در روابط ارائه شده برای ضرایب انتقال حرارت دیده می‌شود، هر دو رابطه تابعی از عدد بی‌بعد رینولدز هستند و برای یک کانال ساده در سیستم با بازچرخش، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu_f} = \frac{2\dot{m}(1+R)}{\mu_f(H+B)} \quad (24)$$

برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از صفحه جاذب با زبری مصنوعی میله منحنی شکل، از رابطه (۲۵)

برای بررسی عملکرد سیستم ترکیبی پیشنهادی، نتایج به دست آمده در چند بخش ارائه شده است. در بخش اول نتایج حاصل برای سیستم ترکیبی پیشنهادی شامل بازچرخش جریان و زبری مصنوعی با دو سیستم ساده و سیستم با بازچرخش جریان مقایسه می شود. در ادامه، تأثیر شدت تابش خورشیدی مورد مطالعه قرار می گیرد. برای مشخص شدن تأثیر بازچرخش روی سیستم ترکیبی همراه با زبری مصنوعی، سیستم ترکیبی در یک زبری مصنوعی مشخص و در چند نسبت بازچرخش بررسی می شود و در نهایت تأثیر پارامترهای هندسی زبری مصنوعی روی عملکرد کلکتور پیشنهادی ارائه می شود.

در شکل (۵) نتایج به دست آمده برای شدت جریان تابش خورشیدی 500 W/m^2 داده شده است. شکل (۵-الف) تغییرات دمای هوای خروجی از کلکتور را برحسب دبی جرمی نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که سیستم ترکیبی با بازچرخش جریان، در هر دو حالت بدون زبری مصنوعی و با زبری مصنوعی، باعث افزایش دمای هوای خروجی نسبت به حالت کلکتور ساده شده است. نتایج حاصل مشخص می کند چه از دبی جرمی تقریباً بیشتر از 0.04 kg/s افزایش دما چندان زیاد نیست. وجود زبری مصنوعی در نظر گرفته شده باعث افزایش دما به خصوص در دبی های جرمی کمتر از 0.03 kg/s شده است. برای نمونه درحالی که در دبی 0.02 kg/s ، کلکتور همراه با بازچرخش جریان هوا و زبری مصنوعی، دمای هوای خروجی تقریباً برابر با 320 کلوین شده و دمای حالت با بازچرخش و بدون زبری مصنوعی تقریباً 316 کلوین و دمای کلکتور ساده 307 کلوین است.



(الف)

برای سیستم کلکتور خورشیدی هواگرمکن از رابطه (۳۳) به دست می آید [۱۲]:

(۳۳)

$$Ex_{u,p} = Ex_o - Ex_i - Ex_w = \dot{m}C_p \left[(T_o - T_i) - T_a \ln \left(\frac{T_o}{T_i} \right) \right] - \frac{T_a}{T_i} W_p$$

برای محاسبه راندمان انرژی، از رابطه انرژی مفید قابل

حصول، بخش بر انرژی ورودی استفاده می شود [۱۲]:

$$\eta_{II} = \frac{Ex_{u,p}}{IA_p \psi} = \frac{Ex_{u,p}}{IA_p \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right)} \quad (34)$$

۵. صحت سنجی

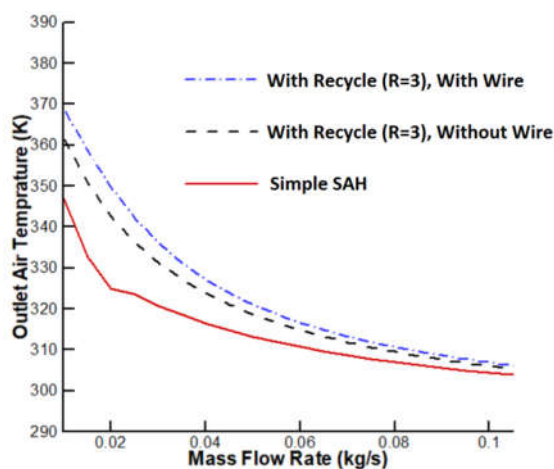
برنامه کامپیوتری نوشته شده، در مرجع [۱۲] به منظور مدل سازی سیستم ترکیبی جدید توسعه داده شده است. به منظور صحت سنجی معادلات ارائه شده در بررسی عملکرد کلکتور با بازچرخش خارجی جریان، نتایج به دست آمده برحسب دمای هوای خروجی و راندمان انرژی با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۰] مقایسه گردیده و در جدول (۱) داده شده است. این مقایسه برای ترکیب بندی مشابه و خصوصیات فیزیکی یکسان از کلکتور و شرایط عملکردی صورت گرفته است. با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول می توان مشاهده نمود که معادلات به کار برده شده برای کلکتور با بازچرخش خارجی، از دقت قابل قبولی برخوردارند. بیشینه اختلاف نسبی بین نتایج به دست آمده برای دمای هوای خروجی و برای راندمان انرژی به ترتیب برابر با 1.5% و 5.9% به دست آمد.

جدول (۱): مقایسه نتایج دمای هوای خروجی و راندمان انرژی به دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج [۱۰] برای کلکتور با بازچرخش خارجی

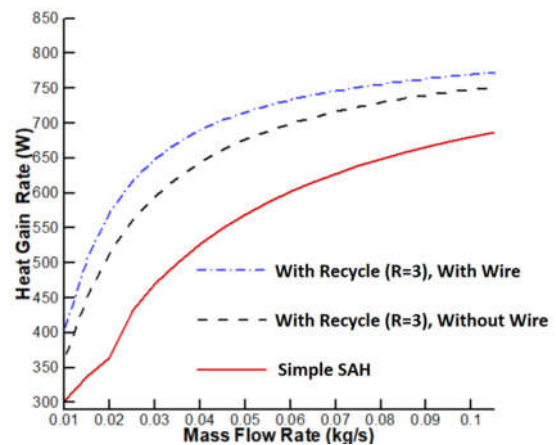
$\dot{m} = 0.02 \text{ (kg/s)}$						
درصد خطا	نتایج [۱۰]	نتایج حاضر	درصد خطا	نتایج [۱۰]	نتایج حاضر	درصد خطا
(%)	η (%)	η (%)	(%)	T_{fo} (K)	T_{fo} (K)	(%)
۵.۹	۴۲.۹	۴۵.۴	۰.۷	۳۰۴.۴	۳۰۴.۲	۰
۴.۸	۵۰.۰	۵۲.۵	۱.۵	۳۰۵.۵	۳۰۵.۸	۱
۳.۶	۵۳.۳	۵۵.۳	۱.۰	۳۰۵.۹	۳۰۶.۲	۲
۲.۵	۵۵.۳	۵۶.۷	۰.۶	۳۰۶.۲	۳۰۶.۴	۳
۲.۳	۵۶.۳	۵۷.۶	۰.۴	۳۰۶.۴	۳۰۶.۵	۴
۱.۴	۵۷.۳	۵۸.۱	۰.۴	۳۰۶.۵	۳۰۶.۶	۵

۶. بحث و بررسی نتایج

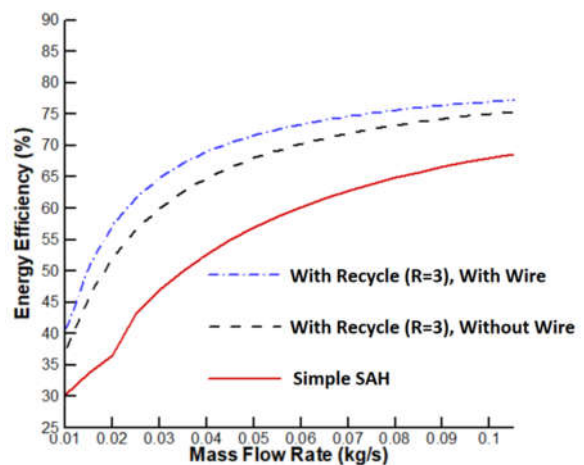
بازچرخش جریان هوا و زبری مصنوعی به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش حرارت دریافتی در محدوده دبی‌های جرمی مورد مطالعه شده است. نمودار (۵-ج) راندمان حرارتی این سیستم را نشان می‌دهد و بیانگر راندمان‌های بالاتر کلکتور در دبی‌های جرمی بالاست. این امر به واسطه افزایش سرعت جریان هوا و به دنبال آن، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و کاهش مقاومت حرارتی است. بررسی این نمودار مشخص می‌کند که سیستم ترکیبی به طور قابل ملاحظه‌ای بهره‌ر حرارتی را افزایش می‌دهد. همچنین وجود زبری مصنوعی، باعث افزایش راندمان انرژی به طور مؤثری شده است. با این حال راندمان انرژی به‌تنهایی نمی‌تواند پارامتر اساسی برای ارزیابی عملکرد کلکتور باشد. لذا در شکل (۵-د) راندمان انرژی برحسب دبی جرمی داده شده است. این نمودار مشخص می‌کند که تأثیر زبری مصنوعی به همراه بازچرخش جریان در دبی‌های جرمی کمتر از 0.05 kg/s می‌تواند عملکرد کلکتور را بهبود بخشد. برای توصیف دلیل فیزیکی این یافته می‌توان بیان نمود که در دبی‌های جرمی کم، به‌خاطر کم بودن عدد رینولدز جریان، عموماً نرخ انتقال حرارت با مکانیزم جابه‌جایی از صفحه‌ی جاذب به جریان هوا کم است و لذا وجود زبری، باعث ایجاد اغتشاش در جریان و در نتیجه، افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. اما در دبی‌های جرمی بالا که عدد رینولدز جریان زیاد و جریان مغشوش است، وجود زبری اغتشاش کمتری (نسبت به حالت دبی کم) در جریان ایجاد می‌کند و این امر باعث افزایش کمتری در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. برای مشخص شدن تأثیر شدت تابش خورشید عملکرد کلکتور پیشنهادی، نتایج برای شدت تابش 1100 W/m^2 در شکل (۶) داده شده است.



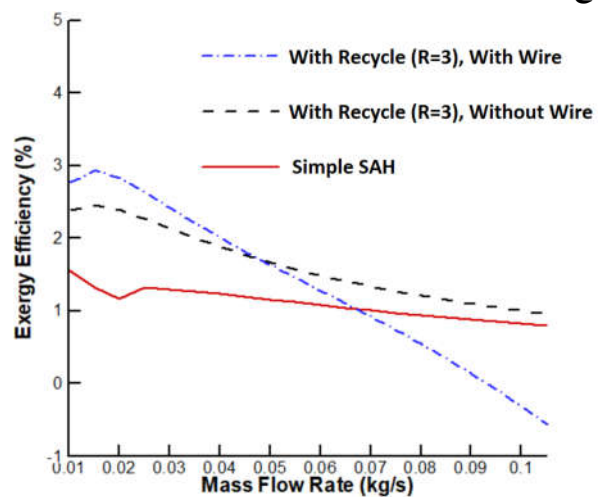
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

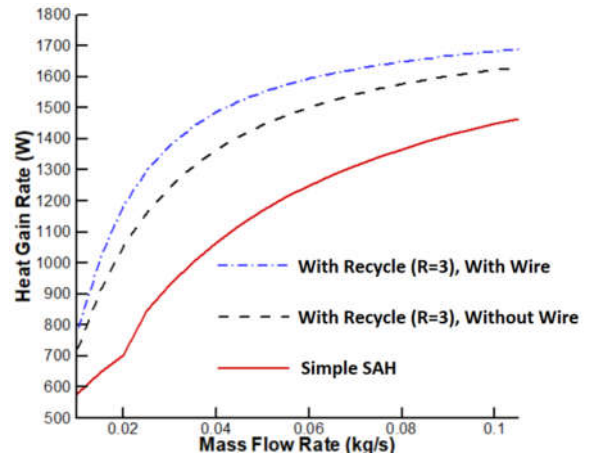
شکل (۵): تغییرات الف. دمای هوای خروجی؛ ب. بهره‌ حرارتی؛ ج. راندمان انرژی؛ د. راندمان انرژی برحسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 500 W/m^2 ، مشخصات زبری مصنوعی $\alpha=45$ و $e/D_h=0.0315$

شکل (۵-ب) بهره‌ حرارتی دریافتی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که سیستم ترکیبی جدید با

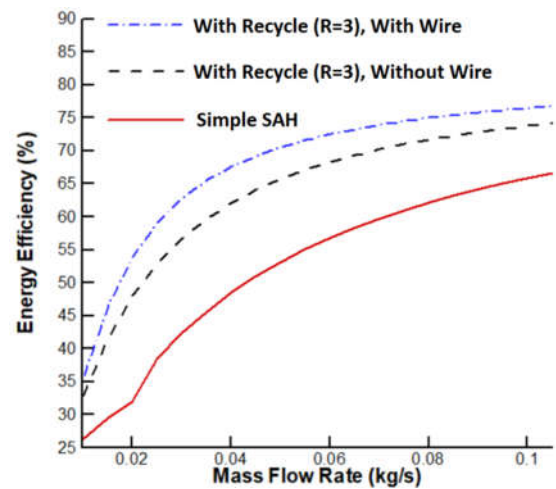
مصنوعی روی بهبود عملکرد کلکتور است. از طرف دیگر راندمان انرژی و آگزرژی در شرایط مشابه نسبت به توان تابش خورشیدی 500 W/m^2 بیشتر شده است. تغییرات راندمان آگزرژی در این شکل به راحتی مشخص می‌کند که عملکرد سیستم ترکیبی جدید، در دبی‌های جرمی کمتر از حدوداً 0.04 kg/s بسیار بهبود یافته است. مهم‌ترین دلیل فیزیکی این مطلب، به خاطر افزایش بهره‌وری حرارتی و عدم افزایش مؤثر افت فشار در یک زبری مشخص و در دو شدت تابش متفاوت است. با توجه به اینکه عملکرد کلکتور با ارزیابی همزمان بهره‌وری حرارتی دریافتی و افت فشار ایجاد شده سنجیده می‌شود، در یک دبی جرمی مشخص، افزایش بهره‌وری حرارتی (به واسطه افزایش شدت تابش برخوردی) در مقابل عدم افزایش افت فشار (که به خواص فیزیکی سیال و ضریب اصطکاک و سرعت سیال وابسته است) باعث بهبود عملکرد کلکتور می‌شود. لذا از نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که سیستم ترکیبی جدید در دبی‌های جرمی کم و شدت تابش خورشیدی زیاد می‌تواند عملکرد کلکتور را به نحو قابل قبولی بهبود بخشد.

برای مشخص شدن اثر نسبت بازچرخش جریان در سیستم ترکیبی جدید، در شکل‌های (۷) و (۸)، راندمان‌های انرژی و آگزرژی بر حسب دبی جرمی و به ترتیب در دو شدت تابش 500 و 1100 W/m^2 و در نسبت بازچرخش‌های مختلف داده شده است. بررسی راندمان انرژی در هر دو شدت تابش، نشان می‌دهد که افزایش ضریب بازچرخش، باعث افزایش راندمان انرژی کلکتور شده است. اما افزایش نرخ بازچرخش بیشتر از ۳، باعث افزایش کمی در راندمان انرژی به ویژه در دبی‌های جرمی بالاتر از 0.05 kg/s شده است.

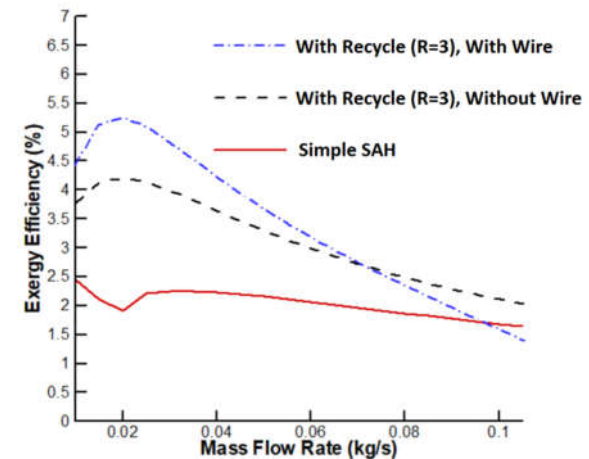
بررسی راندمان آگزرژی در هر دو حالت شدت تابش در شکل‌های (۷) و (۸)، بیانگر عملکرد مناسب بازچرخش جریان در دبی‌های جرمی کمتر از حدود 0.05 kg/s است، اما با افزایش دبی جرمی، از حدود 0.05 kg/s ، راندمان آگزرژی به ویژه در ضریب‌های بازچرخش بالا به شدت کاهش می‌یابد. این یافته نشان می‌دهد که اولاً در حالت کلی عملکرد بازچرخش جریان با ضریب بازچرخش بیشتر از ۳، بهبود کمی در دبی‌های جرمی پایین ایجاد می‌کند و در دبی‌های جرمی بالا، باعث کاهش عملکرد کلکتور هواگرمکن خورشیدی می‌شود. افزایش دبی جرمی بیشتر از 0.05 kg/s باعث کاهش راندمان آگزرژی شده به نحوی که حتی از راندمان آگزرژی مربوط به کلکتور ساده هم می‌تواند کمتر شود. این امر به خاطر تأثیر افت فشارهای زیاد در مسیر کانال مربوط به بازچرخش جریان است که عملکرد کلکتور را مختل می‌کند.



(ب)



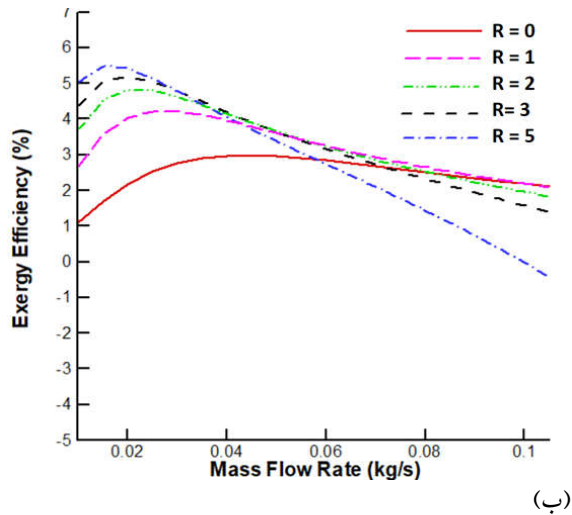
(ج)



(د)

شکل (۶): تغییرات الف. دمای هوای خروجی؛ ب. بهره‌وری حرارتی؛ ج. راندمان انرژی؛ د. راندمان آگزرژی بر حسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 1100 W/m^2 ، مشخصات زبری مصنوعی $e/D_h = 0.0315$ و $\alpha = 45$

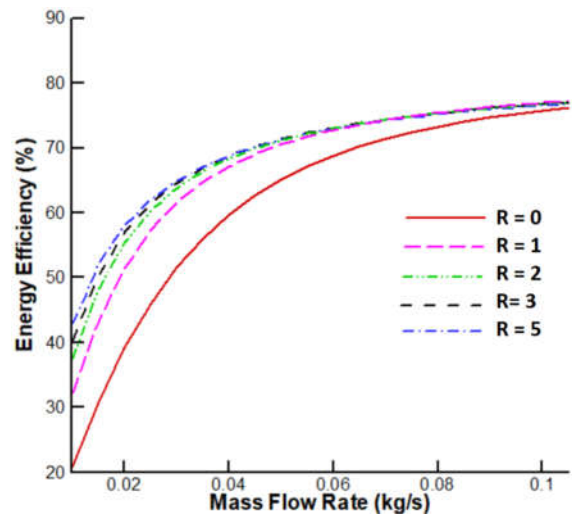
در حالت کلی، رفتار تغییرات دمای خروجی، بهره‌وری حرارتی، راندمان انرژی و راندمان آگزرژی مشابه حالت شدت تابش 500 W/m^2 است. اما نکته اساسی در این نمودار، تأثیر مثبت بیشتر زبری



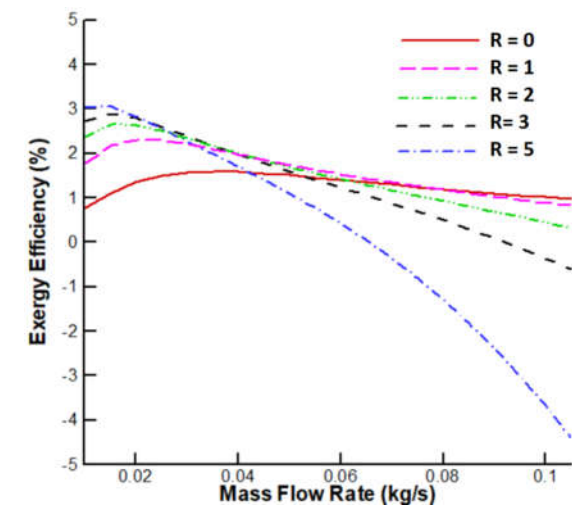
(ب)

شکل (۸): تغییرات الف. راندمان انرژی؛ ب. راندمان انرژی برحسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 1100 W/m^2 و در نسبت بازچرخش‌های جریان مختلف، مشخصات زبری مصنوعی $\alpha=45$ و $e/D_h=0.0315$

برای مشخص شدن تأثیر پارامترهای هندسی زبری مصنوعی از نوع میله منحنی شکل، نتایج برای قطرهای مختلف میله نازک و زاویه انحنا مختلف در ادامه بررسی شده‌اند. در شکل (۹) نتایج راندمان انرژی و آگرژی برای کلکتور هواگرمکن خورشیدی و نسبت بازچرخش جریان هوا برابر با ۲ و نسبت قطر میله فلزی به قطر هیدرولیکی متفاوت (e/D_h) داده شده است. نمودار راندمان انرژی مشخص می‌کند که افزایش قطر میله، باعث افزایش کمی در راندمان انرژی در دبی‌های جرمی کمتر از 0.04 kg/s شده است. این مطلب می‌تواند به دلیل افزایش ایجاد اغتشاش در جریان و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش قطر میله، مغشوش‌کننده جریان باشد. با وجود این، راندمان آگرژی نشان‌دهنده اثر بهبود قابل ملاحظه‌تر در دبی‌های جرمی کمتر از 0.04 kg/s است. این امر می‌تواند به واسطه افزایش کمتر افت فشار با افزایش قطر میله باشد. لذا می‌توان پارامتر قطر میله را در زبری مصنوعی در نظر گرفته‌شده به‌عنوان یک پارامتر مؤثر ارزیابی کرد. در شکل (۱۰) نتایج مربوط به راندمان انرژی و آگرژی، در زاویه‌های انحنا مختلف میله منحنی شکل داده شده است. با توجه به این نمودارها، به راحتی مشخص می‌شود که تغییر زاویه از ۳۰ تا ۶۰ درجه تأثیر قابل توجهی راندمان‌های انرژی و آگرژی ندارند. دلیل این امر به تأثیر کمتر زاویه انحنا روی افزایش ایجاد اغتشاش در جریان است. لذا در این سیستم ترکیبی جدید، می‌توان از تأثیر زاویه انحنا در محدوده ذکر شده صرف‌نظر نمود.

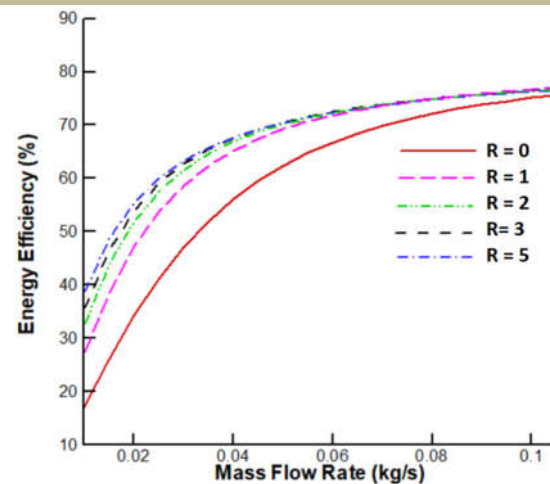


(الف)

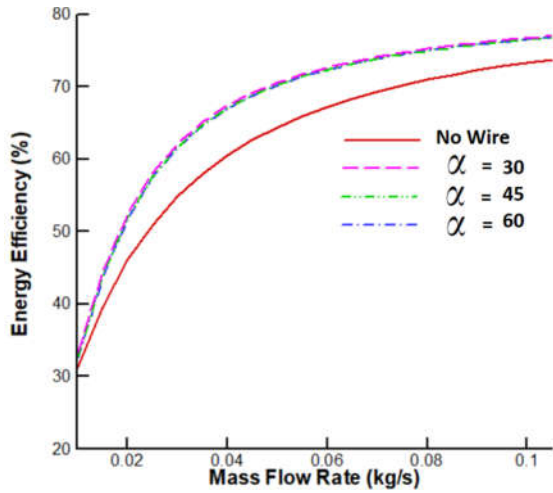


(ب)

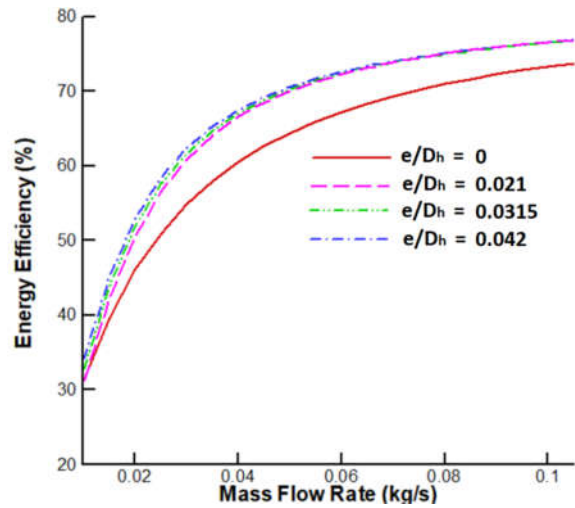
شکل (۷): تغییرات الف. راندمان انرژی؛ ب. راندمان انرژی برحسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 500 W/m^2 و در نسبت بازچرخش‌های جریان مختلف، مشخصات زبری مصنوعی $\alpha=45$ و $e/D_h=0.0315$



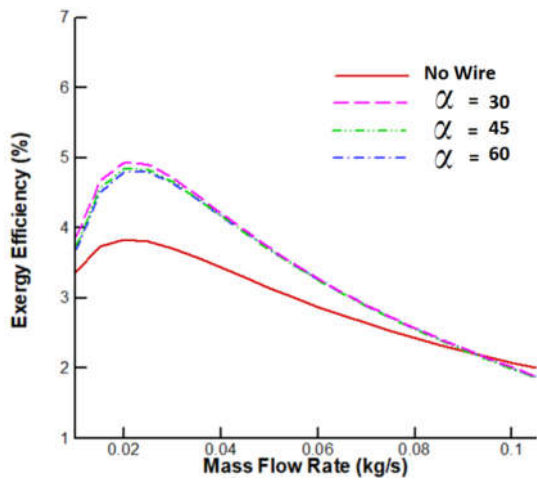
(الف)



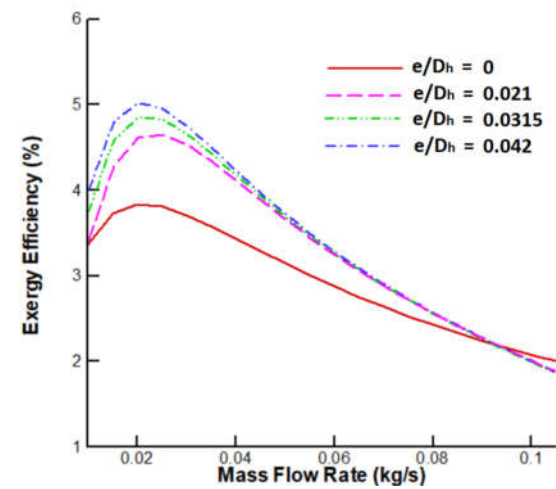
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل (۱۰): تغییرات الف) راندمان انرژی و ب) راندمان انرژی و برحسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 500 W/m^2 و در نسبت‌های مختلف پارامتر زاویه α از زبری مصنوعی و $e/D_h=0.0315$

شکل (۹): تغییرات الف) راندمان انرژی و ب) راندمان انرژی و برحسب دبی جرمی هوا و در شدت تابش خورشیدی 500 W/m^2 و در نسبت‌های مختلف پارامتر e/D_h از زبری مصنوعی، $\alpha=45$

مهم‌ترین نتایج و یافته‌های این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. سیستم کلکتور هواگرمکن خورشیدی با ترکیب جدید پیشنهادشده شامل بازچرخش جریان و زبری مصنوعی از نوع میله نازک منحنی‌شکل، در دبی‌های جرمی حدوداً کمتر از 0.04 kg/s ، به‌طور مؤثری راندمان‌های انرژی و انرژی را افزایش می‌دهد و لذا می‌تواند به‌عنوان یک پیشنهاد مناسب مورد توجه قرار گیرد. این امر به‌سبب عملکرد ضعیف سیستم سستی در دبی‌های جرمی کم می‌باشد که سیستم ترکیبی پیشنهادی این ضعف را تا حد زیادی برطرف کرده است.
۲. با افزایش شدت تابش خورشیدی، بازدهی سیستم

۷. نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های بهره‌بردن از انرژی گرمایی خورشید، استفاده از کلکتورهای خورشیدی هواگرمکن است. در این نوع کلکتورها عموماً به‌دلیل کوچک بودن خواص ترموفیزیکی هوا و نیز کوچک بودن ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی، مقدار جذب حرارت خورشیدی نسبتاً کم است. استفاده از زبری مصنوعی بر روی صفحه جاذب و بازچرخش جریان، به‌عنوان روش‌هایی برای افزایش مقدار انتقال حرارت در کلکتورهای هواگرمکن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق، اثر نصب زبری مصنوعی از نوع میله نازک منحنی‌شکل و نیز بازچرخش جریان بر روی عملکرد گرمایی کلکتور هواگرمکن مورد مطالعه قرار گرفته است.

راندمان انرژی افزایش می‌یابد، اما می‌تواند منجر به راندمان‌های آگزرژی منفی شود.

۴. در سیستم ترکیبی جدید، قطر میله منحنی شکل متصل به صفحه جاذب تأثیر زیادی در عملکرد سیستم دارد؛ درحالی‌که زاویه انحنا آن در محدوده مورد بررسی، تأثیر کمی دارد.

ترکیبی پیشنهادی در تمامی دبی‌های جرمی بررسی شده بهبود یافته است.

۳. افزایش نسبت بازچرخش جریان بیشتر از حدود ۳ (با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر) لزوماً باعث بهبود عملکرد سیستم پیشنهادی نمی‌شود و حتی در دبی‌های جرمی زیاد، می‌تواند از عملکرد سیستم ساده کلکتور خورشیدی نیز بدتر شود و اگرچه

فهرست علائم

عنوان	علامت اختصاری
مساحت صفحه جاذب (m^2)	A_p
عرض کلکتور (m)	B
ضریب تبدیل	C_f
ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg K$)	C_p
قطر هیدرولیکی کانال (m)	D_h
قطر میله منحنی شکل	e
ضریب اصطکاک	f
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (K)	h_c
ضریب انتقال حرارت تشعشعی (K)	h_r
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی باد ($W/m^2 K$)	h_w
ارتفاع کانال (m)	H
شدت تشعشع خورشیدی (W/m^2)	I
رسانش گرمایی ($W/m K$)	k
طول کلکتور (m)	L
نرخ جریان جرمی (kg/s)	\dot{m}
عدد ناسلت	Nu
انرژی مفید (W)	Q_u
عدد رینولدز	Re
نسبت بازچرخش	R
دما (K)	T
ضریب افت حرارتی از پایین ($W/m^2 K$)	U_b
سرعت هوا در داخل کانال (m/s)	V
سرعت باد (m/s)	V
کار فن (دمنده هوا)	W_p
نشانه‌های لاتین	
ضریب جذب	α
ضخامت (m)	δ
اختلاف بین دو پارامتر	Δ
افت فشار (Pa)	ΔP
ضریب صدور	ε
راندمان انرژی	η
لزجت دینامیکی هوا (Ns/m^2)	μ
چگالی هوا (kg/m^3)	ρ
ثابت استفان-بولتزمن	σ
ضریب عبور	τ
پانویس‌ها	
محیط	a
مؤثر	ef
سیال	f
پوشش شیشه‌ای	g
ورودی	i
مقادیر میانگین (متوسط)	m
خروجی	o
صفحه جاذب	p

مراجع

- [1] Goel, V., Hans, V.S., Singh S., Kumar R., Pathak S.K., Singla M., Bhattacharyya S., and Almatrafifh E., Gill R.S., Saini R.P., "A comprehensive study on the progressive development and applications of solar air heaters", Solar Energy, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.040>, 2021.
- [2] Yeh, H.M., Ho, C.D., and Hou, J.Z., "Collector efficiency of double-flow solar air heaters with fins attached", Energy, Vol. 27, PP. 715–27, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00010-5)
- [3] Yeh, H.M., and Ho, C.D., "Solar air heaters with external recycle", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1694–1701, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.027>
- [4] Singh, I., and Singh, S., "A review of artificial roughness geometries employed in solar air heaters", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 92, pp. 405–425, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.108>
- [5] Prasad, B.N., and Saini, J.S., "Effect of artificial roughness on heat transfer and friction factor in a solar air heater", Solar Energy, Vol. 41 No. 6, pp. 555–560, 1988. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90058-8)
- [6] Chaube, A., Sahoo, P.K., and Solanki, S.C., "Analysis of heat transfer augmentation and flow characteristics due to rib roughness over absorber plate of a solar air heater", Renew Energy, Vol. 31, pp. 317–331, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.01.012>
- [7] Karwa, R., and Chauhan, K., "Performance evaluation of solar air heaters having v-down discrete rib roughness on the absorber plate", Energy, Vol. 35, pp. 398–409, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.007>
- [8] Aharwal, K.R., Gandhi, B.K., and Saini, J.S., "Heat transfer and friction characteristics of solar air heater ducts having integral inclined discrete ribs on absorber plate", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 5970–5977, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.05.032>
- [9] Saini, S.K., and Saini, R.P., "Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness". Solar Energy, Vol. 82, No. 12, pp. 1118–1130, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.010>
- [10] Yeh, H.M., and Ho, C.D., "Effect of external recycle on the performances of flat-plate solar air heaters with internal fins attached", Renewable Energy, Vol. 34, pp. 1340–1347, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.005>
- [11] Yeh, H.M., and Ho, C.D., "Solar air heaters with external recycle", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 1694–1701, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.027>
- [12] Mohammadi, K., and Sabzpooshani, M., "Appraising the performance of a baffled solar air heater with external recycle", Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 239–250, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.009>
- [13] Ahmadkhani, A., Sadeghi, Gh., and Safarzadeh, H., "An in depth evaluation of matrix, external upstream and downstream recycles on a double pass flat plate solar air heater efficacy", Thermal Science and Engineering Progress Vol. 21, pp. 100789, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100789>
- [14] Saini, RP, and Verma, J, "Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters", Energy Vol. 33, pp. 1277–1287, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.02.017>
- [15] Singh, I., and Sing, S., "A review of artificial roughness geometries employed in solar air heaters", Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 92, pp. 405–425, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.108>
- [16] Raminder, S.G., Vishavjeet, S.H., and

Rupinder PS, "*Optimization of artificial roughness parameters in a solar air heater duct roughened with hybrid ribs*", Applied

Thermal Engineering Vol. 19, pp. 1-12, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116871>