



Numerical Simulation of Flat Plate Solar Air Heater with Optimal Absorber Effect and Double Glazed Glass*

Research Article

Ali Zanganeh Inalo¹, Mohammad Sefid² , Mohammad Saleh Barghi Jahromi³



[10.22067/jacsm.2024.89384.1278](https://doi.org/10.22067/jacsm.2024.89384.1278)

Abstract

One of the most important disadvantages of solar air heaters is their low thermal performance. The use of porous plates, double-glazed glass, and geometric changes to the absorber plate is methods for improving the heat transfer and thermal performance of solar air heaters. In this numerical study, an attempt is made to investigate the geometric changes made to the solar air heater using the computational fluid dynamics method, and the results are compared with previous research and the optimal state is selected. The maximum thermal efficiency of 82% is related to the presence of three baffles in the solar air heater. The most optimal thickness for the flat plate solar air heater is about 15 to 18 cm thick. The thermal efficiency of double-glazed glass is 20% higher than that of single-glazed glass. Increasing the number of baffles by more than 3 leads to an increase in pressure drop.

Keywords: Solar energy, flat plate solar air heater, thermal efficiency, optimal absorber plate, double glazing, air gap, computational fluid dynamics.

1. Introduction

Flat plate solar air heaters have gained considerable popularity and are being widely used in an increasing number of installations for energy conservation and management purposes. These systems are increasingly recognized for their effectiveness in harnessing solar energy to reduce energy consumption and improve overall efficiency in various settings. They have significant appeal for various low-temperature energy applications that require air temperatures below 100°C [1]. This temperature range is handy for several practical purposes. For example, these applications can efficiently heat indoor spaces, ensuring optimal comfort levels in residential and commercial environments. Furthermore, they are useful in the dehydration processes of industrial products, which is essential for increasing shelf life and maintaining quality [2]. Furthermore, drying agricultural products and medicinal plants is another vital application that helps to preserve their properties and increase their usability. All these applications demonstrate the versatility and

importance of these energy applications in various fields. One of the primary disadvantages associated with solar air heater systems is their relatively low thermal efficiency, which can limit their overall performance in converting solar energy into usable heat. In addition, these systems often suffer from low thermal storage capacity, meaning they are not always able to retain heat effectively for later use. Various methods have been widely researched and implemented in an attempt to increase the thermal efficiency of solar air heating systems. These methods include combining absorber plates with various geometric designs, introducing holes and obstacles in the airflow path, and using porous plates, which can facilitate better interaction between the air and the absorber surface, thereby increasing the heat transfer rate [3-4].

2. Numerical Modeling

A solar air heater consists of several parts, such as a glass cover, an air passage channel, and an absorber plate. In the solar air heater discussed in this section, baffles are used in the air channel. Fig. 1 shows a flat-plate solar air heater with absorber plates.

In this study, the K-epsilon Realizable turbulence model has been used. The K-epsilon Realizable turbulence model performs very well compared to other models in the K-epsilon family when the flow has a reverse gradient or separation. In all experiments, the calculated Reynolds number is in the range of 3700 to 11000, which indicates a turbulent flow pattern.

The boundary conditions used for the flat plate solar air heater are shown in Fig. 3.

*Manuscript received August 13, 2024. Revised September 16, 2024, Accepted December 9, 2024.

¹ MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

² Corresponding author, Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. **Email:** mhsefid@yazd.ac.ir

³ PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

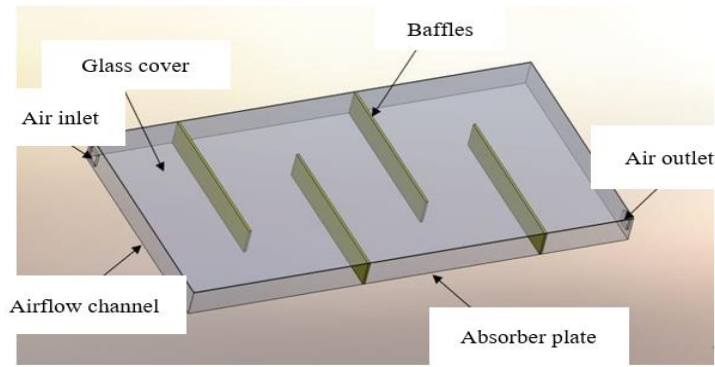


Fig. 1. Solar air heater considered in this research

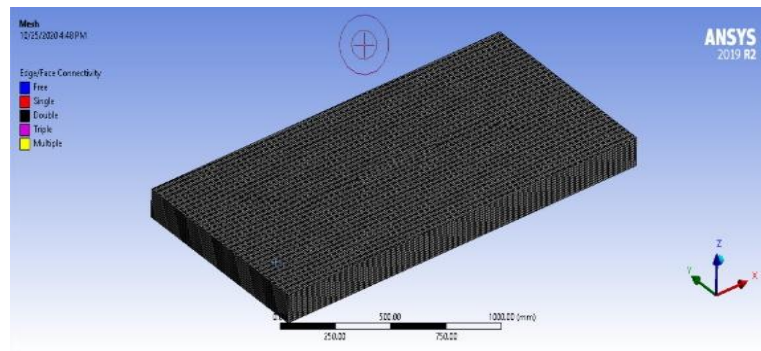


Fig. 2. Desired mesh for flat plate solar air heater

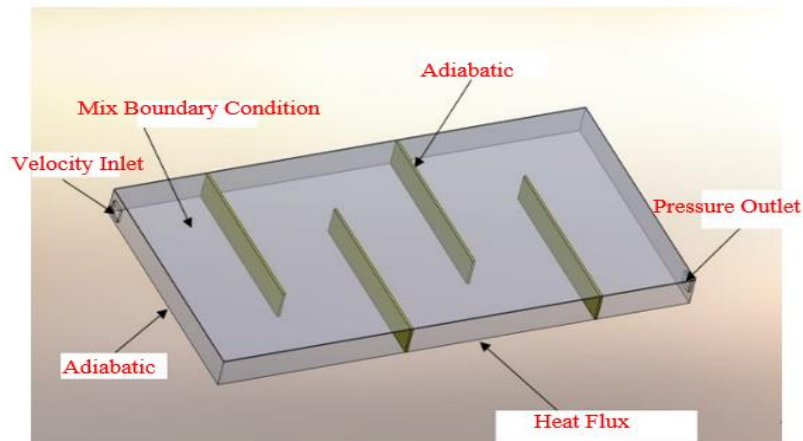


Fig. 3. Boundary conditions selected in this study

3. Analysis of results

Fig. 4 shows the thermal efficiency at different numbers of baffles. As is clear, the highest efficiency is related to the 3-baffle case because the average glass surface temperature, the average temperature in the middle plate, and flow turbulence, in this case, performed better than the other cases. This graph shows that the efficiency in the 3-baffle mode is 82.48% and in the 4-baffle mode, it is 82.05%. The efficiency of the air heater decreases with increasing the number of baffles. The reason for this can be explained by the increase in temperature on the glass

surface, the increase in flow turbulence, and the pressure drop.

By examining the contours in Figure 5, it can be seen that in the 9-baffle state, or state (d), the temperature uniformity is greater or the so-called flow is uniform, but in the last baffle, the temperature of the fluid behind the baffle has increased. This is because the flow is heated after passing through the baffle and some of this heated flow is trapped behind the last baffle and starts to rotate, and its temperature gradually increases.

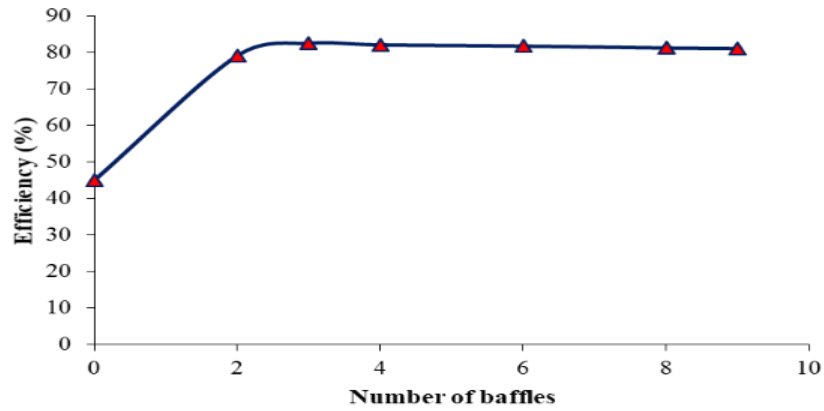
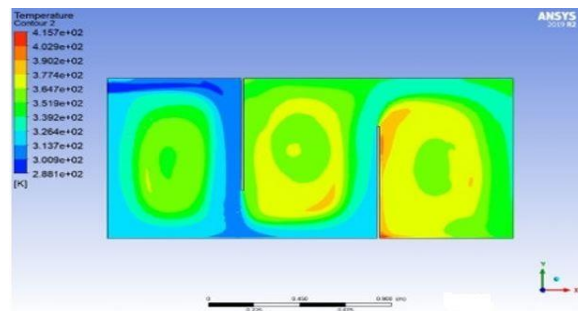
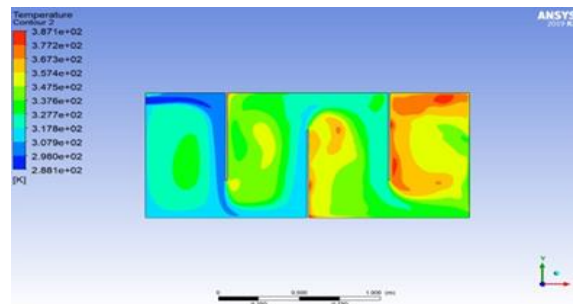


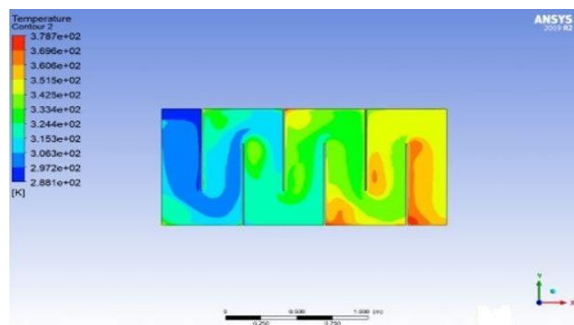
Fig. 4. Variations in efficiency versus number of baffles



(A)



(B)



(C)

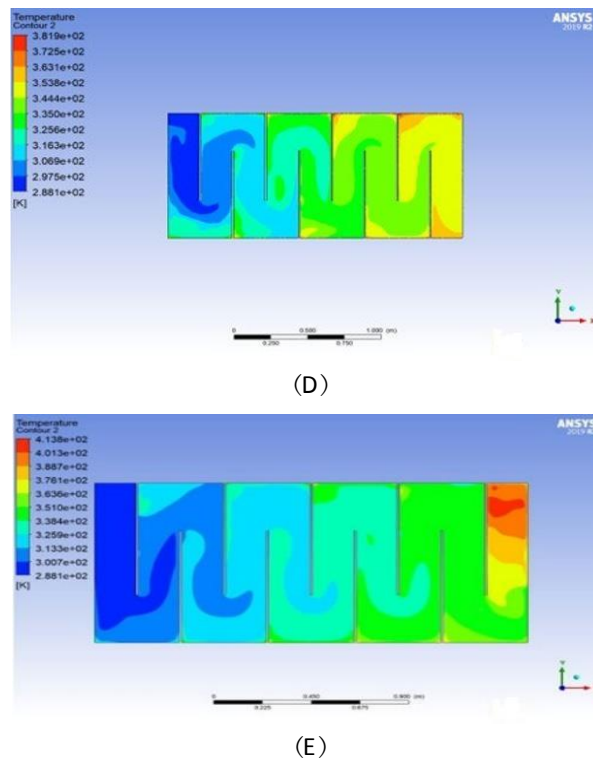


Fig. 5. Temperature contours, (a) two baffles, (b) three baffles, (c) six baffles, (d) eight baffles and (e) nine baffles

4. Conclusion

In this study, a flat plate solar air heater was investigated using computational fluid dynamics with the aim of optimizing the energy harvested from the air heater using different geometric arrangements and finding the most optimal state. Geometry modeling was done using SolidWorks software and then this model was imported into ANSYS software to continue the modeling and analysis process. The most important results of this research were summarized as follows:

- As the inlet flow velocity increased, the outlet temperature and ultimately the efficiency of the air heater increased.
- In the case of an air heater with the presence of baffles, the highest flow velocity occurs at the inlet and outlet, and the lowest flow velocity occurs behind the plates due to the presence of circulating flow.
- Temperature uniformity was higher for the 9-baffle mode and the flow was uniform in this mode. The highest overall efficiency was related to the presence of three baffles in the air heater, which achieved an efficiency of about 82%.

References

- [1] Barghi Jahromi, Mohammad Saleh, and Massoud Iranmanesh, "Experimental investigation on the use of PCM in a pistachio solar dryer by the evacuated heat pipe solar collector," *Journal of Pistachio Science and Technology*, Vol. 3, PP. 73-87, (2019). (In Persian)
- [2] M. S. B. Jahromi, V. Kalantar, M. Sefid, H. S. Akhijahani, and M. Iranmanesh, "Energy and exergy

analysis of an unglazed transpired collector connected to a dryer with a porous plate and phase change material," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, p. 106693, (2023).

- [3] M. Yang, X. Yang, X. Li, Z. Wang, and P. Wang, "Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1349–1362, Sep, (2013).
- [4] R. Fattoum, A. Hidouri, M. E. H. Attia, M. Arıcı, and M. A. Abbassi, "Optimization of solar air heaters performance using parallel porous wire mesh: energy, exergy, and enviro-economic analyses," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 48, p. 102385, Jan, (2024). [https://doi: 10.1016/j.tsep.2024.102385](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102385).



شبیه‌سازی عددی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با تأثیر جاذب بهینه و شیشه دوجداره*

مقاله پژوهشی

محمد صالح برقی جهرمی^(۳)محمد سفید^(۲) علی زنگنه اینالو^(۱)

10.22067/jacsm.2024.89384.1278

چکیده هواگرمن‌های خورشیدی صفحه تخت به دلیل هزینه ساخت پایین و تعمیر و نگهداری آسان نسبت به سایر کلکتورها محبوبیت زیادی برای استفاده در گرمایش فضا و همچنین فرآیندهای صنعتی پیدا کرده است. یکی از مهمترین معایب هواگرمن‌های خورشیدی، عملکرد حرارتی پایین آن‌ها می‌باشد. با توجه به این که با استفاده از سطوح گسترش‌یافته روی جاذب، استفاده از شیشه ضخیم‌تر، استفاده از محیط متخلخل و تغییرات هندسی روی صفحه جاذب (موج‌دار کردن صفحه جاذب با الگوهای مختلف) روش‌هایی برای بهبود انتقال حرارت و عملکرد حرارتی هواگرمن‌های خورشیدی با هزینه کم می‌باشد، بنابراین در این پژوهش عددی سعی بر این است که تغییرات هندسی ایجادشده بر روی هواگرمن خورشیدی با روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شود و نتیجه آن با پژوهش‌های انجام‌شده مقایسه و حالت بهینه انتخاب گردد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن تعدادی بافل به هواگرمن، دمای خروجی و در نتیجه بازده کلی هواگرمن افزایش می‌یابد. ماکزیمم میزان بازده حرارتی به مقدار ۸۲ درصد مربوط به وجود سه بافل در هواگرمن خورشیدی بود. همچنین افزایش بیش از ۳ عددی بافل‌ها، منجر به افزایش افت فشار می‌شود. نتایج بهینه سازی تغییر فاصله هوایی (ضخامت) و شیشه تک و دوجداره نشان می‌دهد که بهینه‌ترین ضخامت برای هواگرمن خورشیدی صفحه تخت، ضخامت حدود ۱۵ الی ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد. بازده حرارتی شیشه دوجداره ۲۰ درصد از حالت تک جداره بیشتر است.

واژه‌های کلیدی انرژی خورشیدی، هواگرمن خورشیدی صفحه تخت، بازده حرارتی، صفحه جاذب بهینه، شیشه دو جداره

مقدمه

با راندمان بالا بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای بحرانی، از دیدگاه مواد، توسعه یافته است؛ برای این منظور از صفحه جاذب از جنس آهن [4-5]، فایبرگلاس به رنگ مشکی [6] و از جنس استیل [7] استفاده شده است. همچنین بهینه‌سازی ساختار هواگرمن در مطالعات محققان به صورت استفاده از صفحه جاذب با هندسه مخروطی [8]، استفاده از صفحه جاذب از جنس مس به صورت کوئل مارپیچ [9]، استفاده از صفحه جاذب به صورت دو مسیره و قرار دادن بافل در مسیر اول و تیغه در مسیر دوم [10] و استفاده از صفحه جاذب موجدار [11] مورد بررسی قرار گرفته است. افزودن پره‌ها در گذر جریان هوا به طور گسترده به عنوان یک روش موثر برای افزایش راندمان حرارتی در نظر گرفته می‌شود [2,3].

هواگرمن‌های خورشیدی صفحه تخت (Flat Plate Solar Air Heater) به طور گسترده‌ای برای حفظ و مدیریت انرژی در تعداد فزاینده‌ای از تاسیسات مورد استفاده قرار گرفته است. آن‌ها برای کاربردهای انرژی با درجه حرارت پایین که به دمای هوای زیر ۱۰۰ درجه سلسیوس نیاز دارند کاملاً جذاب هستند. به عنوان مثال می‌توان به گرمایش فضاهای داخلی ساختمان، کم آبی محصولات صنعتی و خشک کردن محصولات کشاورزی و گیاهان دارویی اشاره کرد [1-3]. اشکالات عمده سیستم هواگرمن‌های خورشیدی شامل راندمان حرارتی نسبتاً پایین و ظرفیت ذخیره حرارتی کم سیستم است. روش‌هایی برای بهبود راندمان حرارتی هواگرمن‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است و پیشنهادات طراحی کمی یا کیفی برای هواگرمن

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۵/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۹/۱۹ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

(۳) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

مطالعات جدیدی برای افزایش راندمان هواگرمن‌های خورشیدی انجام شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. فاتوم و همکاران به بهینه‌سازی هواگرمن خورشیدی با صفحه‌ای به صورت شبکه سیمی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با طول ۶۰ سانتی متر برای شبکه سیمی و دبی جریان هوا به مقدار ۰/۰۴۵ کیلوگرم برثانیه بیشترین راندمان هواگرمن به مقدار ۷۶ درصد می‌رسد [12]. سینگ و همکاران به بهینه‌سازی یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که راندمان حرارتی ۵۰/۸۹ درصد و راندمان انرژی ۸/۷۶ درصد به دست می‌آید [13]. کوریل و همکاران یک هواگرمن خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دادند و پارامتر عملکرد ترمویدرولیک را برای باله‌های مستطیلی بررسی کردند. حداکثر عملکرد ترمویدرولیک ۲/۷۷ برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ با گام ۱۷/۲۲ به دست آمد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی انجام شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد [14]. برقی جهرمی و همکاران به شبیه‌سازی یک هواگرمن خورشیدی مشبک متصل به خشک‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با کاهش نرخ جریان هوا دمای هوای خروجی هواگرمن افزایش پیدا می‌کند. بیشترین بازده حرارتی مربوط به دبی ۰/۰۱۵ کیلوگرم برثانیه به مقدار ۷۸/۰۲ درصد است [15]. برقی جهرمی و همکاران به ارزیابی یک هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با ماده تغییر فاز دهنده و صفحه متخلخل پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با استفاده از ذخیره‌کننده حرارتی بازده انرژی حدوداً ۶ درصد افزایش یافته است. بیشترین بازده حرارتی هواگرمن به مقدار ۴۵/۹۲ درصد است [2]. پارسا و همکاران یک هواگرمن خورشیدی با بافل‌های مکعبی را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بالاترین عملکرد ترمویدرولیک با مقدار ۳/۴۳ برای عدد رینولدز ۵۰۸۰ به دست آمد [16]. پانگیتز و همکاران به بررسی تجربی و عددی یک هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با جریان‌های موازی و مخالف در داخل هواگرمن پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میانگین راندمان حرارتی بین ۱۱ تا ۴۴ درصد متغیر است. مدل‌های محاسباتی، بازده حرارتی را بین ۶/۷۵ تا ۹/۰۱ درصد از مقدار اندازه‌گیری شده، بسته به ورودی توان تابشی خورشیدی مورد استفاده، بیش از حد پیش‌بینی می‌کنند [17]. حیدری و مسگرپور به تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی هواگرمن

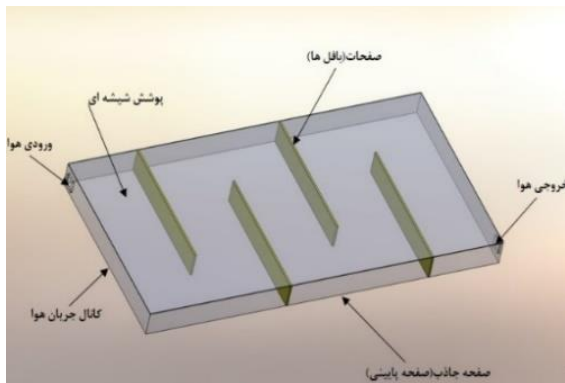
خورشیدی صفحه تخت با مسیر جریان مارپیچ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میانگین راندمان حرارتی هواگرمن خورشیدی با دو مسیر جریان با کانال مارپیچ ۱۴/۷ درصد بیشتر از مجرای ساده و ۸/۶ درصد بیشتر از هواگرمن خورشیدی با دو مسیر جریان با پره با سرعت جریان جرمی یکسان برآورد شده است [18]. اخباری و همکاران به مدل‌سازی و مطالعه تجربی یک هواگرمن خورشیدی با کانال مثلثی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در مقایسه با یک مدل انتگرال معادلات تراز کلی انرژی، مدل توسعه‌یافته کاهش ۵۰ درصدی خطا را در پیش‌بینی بازده حرارتی و دمای هوای خروجی نشان می‌دهد. حداکثر بازده حرارتی سیستم را می‌توان در نرخ جریان جرم هوا ۰/۰۴۵ کیلوگرم بر ثانیه به دست آورد [19].

با توجه به بررسی مطالعات پیشین، شکاف تحقیقاتی در زمینه بهینه‌سازی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با توجه به پارامترهای مختلف به طور همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین نوآوری این پژوهش بهینه‌سازی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت از لحاظ پارامترهای مختلف با استفاده از پره (تعداد پره در حالت‌های مختلف) و بدون پره، تغییر فاصله هوایی (۱۸،۱۵،۱۲،۶ و ۲۴ سانتی متر) و تأثیر شیشه تک جداره و دو جداره به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. کاتوره‌های دما و سرعت به روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم افزار انسیس فلونت استخراج شد و پارامترهای بازده حرارتی و افت فشار برای حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هواگرمن خورشیدی صفحه تخت برای متصل شدن به خشک‌کن خورشیدی و آب گرم کن خورشیدی طراحی شده است.

مدل سازی عددی

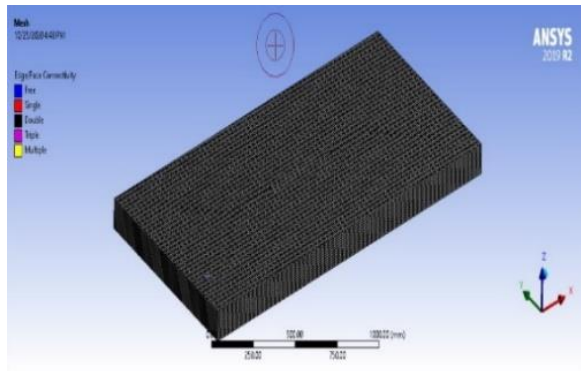
برای بررسی عملکرد هواگرمن خورشیدی ابتدا باید معادلات حاکم بر جریان در آن را شناخت. همچنین جهت ساده‌سازی معادلات حاکم و همچنین افزایش سرعت محاسبات، می‌بایست فرضیاتی را در نظر گرفت که در ادامه ذکر می‌شوند. معادلات حاکم بر جریان عبارت‌اند از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، اما از آنجایی که در هواگرمن خورشیدی از انرژی خورشید جهت گرم کردن سیال کاری استفاده می‌شود باید معادله انتقال تشعشعی را هم در نظر داشت. این معادلات در ادامه ذکر می‌شوند.

مطالعات جدیدی برای افزایش راندمان هواگرمن‌های خورشیدی انجام شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. فاتوم و همکاران به بهینه‌سازی هواگرمن خورشیدی با صفحه‌ای به صورت شبکه سیمی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با طول ۶۰ سانتی متر برای شبکه سیمی و دبی جریان هوا به مقدار ۰/۰۴۵ کیلوگرم برثانیه بیشترین راندمان هواگرمن به مقدار ۷۶ درصد می‌رسد [12]. سینگ و همکاران به بهینه‌سازی یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که راندمان حرارتی ۵۰/۸۹ درصد و راندمان انرژی ۸/۷۶ درصد به دست می‌آید [13]. کوریل و همکاران یک هواگرمن خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دادند و پارامتر عملکرد ترمویدرولیک را برای باله‌های مستطیلی بررسی کردند. حداکثر عملکرد ترمویدرولیک ۲/۷۷ برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ با گام ۱۷/۲۲ به دست آمد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی انجام شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد [14]. برقی جهرمی و همکاران به شبیه‌سازی یک هواگرمن خورشیدی مشبک متصل به خشک‌کن خورشیدی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با کاهش نرخ جریان هوا دمای هوای خروجی هواگرمن افزایش پیدا می‌کند. بیشترین بازده حرارتی مربوط به دبی ۰/۰۱۵ کیلوگرم برثانیه به مقدار ۷۸/۰۲ درصد است [15]. برقی جهرمی و همکاران به ارزیابی یک هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با ماده تغییر فاز دهنده و صفحه متخلخل پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با استفاده از ذخیره‌کننده حرارتی بازده انرژی حدوداً ۶ درصد افزایش یافته است. بیشترین بازده حرارتی هواگرمن به مقدار ۴۵/۹۲ درصد است [2]. پارسا و همکاران یک هواگرمن خورشیدی با بافل‌های مکعبی را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بالاترین عملکرد ترمویدرولیک با مقدار ۳/۴۳ برای عدد رینولدز ۵۰۸۰ به دست آمد [16]. پانگیتز و همکاران به بررسی تجربی و عددی یک هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با جریان‌های موازی و مخالف در داخل هواگرمن پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میانگین راندمان حرارتی بین ۱۱ تا ۴۴ درصد متغیر است. مدل‌های محاسباتی، بازده حرارتی را بین ۶/۷۵ تا ۹/۰۱ درصد از مقدار اندازه‌گیری شده، بسته به ورودی توان تابشی خورشیدی مورد استفاده، بیش از حد پیش‌بینی می‌کنند [17]. حیدری و مسگرپور به تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی هواگرمن



شکل ۱ هواگرمن خورشیدی در نظر گرفته شده در این پژوهش

در این پژوهش از مدل آشفتگی K-epsilon Realizable استفاده شده است. مدل توربولانسی K-epsilon Realizable نسبت به مدل‌های دیگر خانواده K-epsilon، زمانی که جریان دارای گرادیان معکوس یا جدایش است بسیار عالی کار می‌کند. در تمامی آزمایش‌ها عدد رینولدز محاسبه شده در محدوده ۳۷۰۰ تا ۱۱۰۰۰ است که نشان دهنده الگوی جریان مغشوش است. شبکه بندی هندسه در شکل (۲) ارائه شده است. همان طور که مشخص است از شبکه بندی سازمان یافته استفاده شده است.



شکل ۲ هواگرمن خورشیدی صفحه تخت مش بندی شده

هواگرمن خورشیدی با ابعاد $0.12 \times 1 \times 2$ متر در شکل (۱) در نظر گرفته شده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

در این تحقیق، به منظور ساده سازی معادلات، فرصیات زیر در نظر گرفته شد:

- ۱- انتقال حرارت از کف هواگرمن ناچیز در نظر رفته می‌شود.
- ۲- اتلاف گرما از ورودی و خروجی هواگرمن ناچیز در نظر گرفته می‌شود.
- ۳- انتقال حرارت بین بافل و صفحه جاذب ناچیز در نظر رفته می‌شود.

۴- فرض می‌شود که تشعشعات با طول موج بلند ارسالی از صفحه جاذب نمی‌تواند مستقیماً به پوشش شیشه‌ای بالایی برسد و همچنین با محیط هم نمی‌تواند تبادل حرارت داشته باشد.

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده اتلاف گرما در کلکتور صفحه تخت به صورت جابجایی و تشعشع بین پوشش شیشه‌ای بالایی و محیط اطراف خلاصه می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر هندسه‌ی جاذب روی عملکرد هواگرمن خورشیدی و بهبود عملکرد آن، از روش شبیه‌سازی مبتنی بر آنالیز حجم محدود استفاده شده است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا باید مدل سه‌بعدی هواگرمن، طراحی شود. بدین منظور از نرم‌افزار سالیدورک (Solid Works, version 18.0.0)، استفاده شده است. سپس جهت اعمال شرایط مرزی و اولیه، مش بندی، حل مسئله، استخراج نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها این مدل سه‌بعدی وارد نرم‌افزار انسیس فلوننت (ANSYS workbench 2.0 framework version 19.0.0) می‌شود. در این

پژوهش، جریان مغشوش، غیرقابل تراکم، سه‌بعدی و سیال هوا در یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از معادلات حاکم پیوستگی، مومنتوم و انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که یکی از علت‌هایی که می‌توان جریان را مغشوش در نظر گرفت وجود جدایی جریان به علت وجود بافل‌ها است [20-21]. تأثیر وجود فین، تعداد فین، سرعت‌های ورودی جریان، فاصله هوایی و ضخامت پوشش شیشه‌ای بر روی عملکرد و کارایی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت بررسی می‌شود. یک هواگرمن خورشیدی از چندین قسمت تشکیل می‌شود مانند پوشش شیشه‌ای، کانال عبور هوا و صفحه جاذب. در هواگرمن خورشیدی که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد از صفحات (بافل) در کانال هوا استفاده می‌شود. در شکل (۱) هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با صفحات جاذب را نشان می‌دهد.

که در رابطه (۴)، C_p گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم کلونین) و T_{ref} دمای مرجع هست که برابر ۳۰۰ کلونین در نظر گرفته شده است.

از مدل مجزا سازی معادلات (DO) برای مدل‌سازی تشعشع جهت انتقال حرارت بین جاذب، شیشه و دیواره استفاده می‌شود. مجزا سازی، معادلات انتقال تشعشع را برای گره و المان‌ها در نظر می‌گیرد. معادلات انتقال تشعشعی برای جاذب، تشعشع و پخش برای یک موقعیت اختیاری \vec{r} در یک محدوده در جهت \vec{s} می‌توان نوشت.

معادله ۵، انتقال تشعشعی برای جاذب، تشعشع و پخش در حد متوسط را بر اساس معادلات مجزا سازی نشان می‌دهد:

$$d\Omega' \nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}') \quad (5)$$

که در رابطه (۵)، \vec{r} بردار موقعیت، \vec{s} بردار جهت، \vec{s}' بردار جهت پراکندگی، a ضریب جذب، a شاخص انعکاس، σ_s ضریب پخش، σ ثابت استفان بولتزمن، I شدت تشعشع، T دمای محلی، φ تابع فاز، Ω' زاویه جسم هستند.

اثر ویسکوزیته سیال، شناوری و آشفتگی باید برای فرآیند شبیه سازی در نظر گرفته شود تا تصویر دقیقی از توزیع هوا و انتقال حرارت از طریق سیستم هواگرمن خورشیدی صفحه تخت به دست آید. مدل K-epsilon یکی از قابل اعتمادترین مدل‌هایی است که وجود دارد. مدل دارای دو معادله انتقال است که پدیده آشفته در شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) را توصیف می‌کند. مدل K-epsilon به عنوان مدل موفقی است که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو معادله آشفته ذکر شده برای مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به صورت زیر نشان داده شده است [16]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (7)$$

جدول ۱ مشخصات هواگرمن خورشیدی صفحه تخت در این پژوهش

مشخصات (ابعاد و اندازه)	اجزاء هواگرمن خورشیدی صفحه تخت
هواگرمن خورشیدی با ابعاد ۰/۱۲ × ۱ × ۲ متر است.	صفحه جاذب
جریان از قسمت ورودی که یک دریچه مربعی ۶۰ × ۶۰ میلی‌متر است، وارد و از سمت دیگر آن خارج می‌شود.	دریچه هوای ورودی
صفحه‌ی بالایی از جنس شیشه با ضخامت ۴ میلی‌متر و صفحه‌ی پایینی از جنس آلومینیوم و دارای ضریب جذب مشخص است.	شیشه

۳- مبانی تئوری روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

مدل‌سازی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با سه معادله اصلی شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتوم و انرژی انجام شد. [22-24]. از آنجایی که جریان با سرعت پایین جریان دارد و عدد ماخ پایین است پس می‌توان جریان را به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفت. بر این اساس، معادله‌ی پیوستگی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم نیز بر اساس فرضیات مسئله، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) \quad (2)$$

که در این معادلات ρ چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب) جریان، μ ویسکوزیته (نیوتن ثانیه بر مترمربع) سیال، p فشار (نیوتن بر مترمربع)، \vec{v} سرعت سیال (متر بر ثانیه) و t زمان جریان (ثانیه) هستند. معادله انرژی برای جریان سیال و کلکتور خورشیدی را نیز می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، H آنتالپی (ژول بر کیلوگرم)، T دما (کلونین)، k هدایت حرارتی (وات بر متر کلونین) هستند.

همچنین میزان آنتالپی در کلکتور را نیز به صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

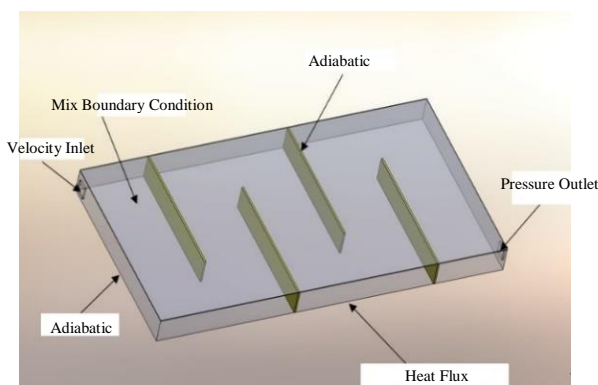
$$H = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4)$$

$$\eta_c = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{AG} \quad (6)$$

که در این رابطه \dot{m} نرخ دبی ورودی به هواگرمن (کیلوگرم بر ثانیه)، C_p ظرفیت گرمایی هوا (ژول بر کیلوگرم کلونین)، T_{out} دمای خروجی از هواگرمن (کلونین)، T_{in} دمای هوای ورودی (کلونین)، A سطح پوشش شیشه‌ای بالایی هواگرمن (مترمربع) و G میزان تابش خورشیدی به سطح هواگرمن است.

جدول ۱ مشخصات سیال عامل و شرایط مرزی

مکان	نوع شرایط مرزی	خواص
ورودی	Velocity Inlet	-
خروجی	Pressure Outlet	-
صفحه جاذب	Heat Flux	$\epsilon_c = 0.1$
پوشش بالایی (شیشه)	Mix Boundary Condition	$\rho = 2500 \text{ Kg}/\text{m}^3$
	$h_f = 20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$	$C_p = 800 \text{ J}/\text{Kg.k}$
	$t_f = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$\lambda = 0.75 \text{ W}/\text{m.k}$
	$\epsilon_g = \alpha_g = 0.9$	
باغل	Adiabatic	-
دیواره‌های جانبی	Adiabatic	-



شکل ۳ شرایط مرزی انتخاب شده در این پژوهش

که در آن σ_K و σ_ϵ اعداد پراوتل برای k ، ϵ ، C_1 ، C_2 و $C_{3\epsilon}$ ثابت‌های معادله جریان مغشوش می‌باشد.

در قسمت شبیه‌سازی برای معادلات مومنتوم و انرژی اعمال شده معادلات دیفرانسیلی درجه دو در نظر گرفته شد. برای ارتباط فشار و سرعت از روش سیمپل (SIMPLE) استفاده شد، چرا که در مسائلی که دارای جریان‌های توربولانسی هستند استفاده از این روش منجر به حصول بهینه‌ترین جواب می‌شود [22-23]. برای حل معادلات مومنتوم و پیوستگی از حل‌کننده‌ی مبتنی بر فشار (Pressure Base) استفاده شد. برای الگوریتم حل از الگوریتم کوپل شده (Coupled) استفاده شد. در این الگوریتم معادلات مومنتوم و پیوستگی به صورت ترکیبی حل می‌شوند که این کار باعث تسریع در همگرایی حل می‌شود.

همچنین محدوده مورد نظر برای همگرایی باقیمانده برای معادلات جرم و مومنتوم به میزان 10^{-4} و برای معادله انرژی به میزان 10^{-5} لحاظ گردید.

شرایط مرزی. مشخصات سیال و شرایط مرزی در جدول ۱ و شکل (۳) نشان داده شده است. در این جدول تمامی شرایط مرزی برای میدان حل ذکر شده است. برای شرط مرزی ورودی جریان از شرط مرزی ورودی (Velocity Inlet) استفاده شده است. سرعت‌های مرزی ۴،۲ و ۶ متر بر ثانیه برای جریان هوای ورودی در نظر گرفته می‌شود و برای هرکدام از سرعت‌های ورودی در نظر گرفته شده یکبار مسئله حل شده و کارایی هواگرمن خورشیدی محاسبه و این مقادیر باهم مقایسه می‌شوند. در قسمت ورودی شدت توربولانس ۱ درصد در نظر گرفته شده است.

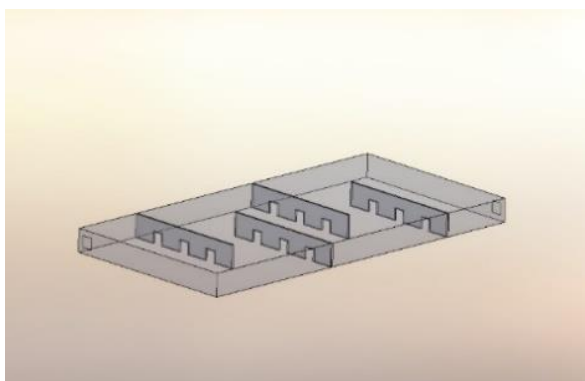
کیفیت مش ایجاد شده توسط نرم‌افزار بر چگونگی حل مسئله بسیار تاثیرگذار است. برای مش بندی میدان حل از پردازشگر انسیس مشینگ (ANSYS Meshing) استفاده شده است. پنج نوع مش بندی مختلف برای هواگرمن طراحی شده است. تعداد گره‌ها و المان‌های به کار برده شده برای انجام مش-بندی در جدول ۲ نشان داده شده است. برای هرکدام از این حالت-ها مسئله حل شد و میزان بازدهی (کارایی) هواگرمن با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد [25-27].

همکاران [27] در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها یک هواگرمن صفحه تخت با چهار صفحه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با فاصله‌های مساوی و طول ۷۰۰ میلی‌متر تعریف کردند که هرکدام از این صفحات دارای سه سوراخ مربعی شکل با ابعاد 60×60 میلی‌متر بوده که با فاصله‌های مساوی از هم (۱۳۰ میلی‌متر) قرار گرفته است. این هواگرمن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵ هواگرمن صفحه تخت بررسی شده توسط هو و همکاران [27]

همانند مراحل پیشین ابتدا این هواگرمن مدل‌سازی شد که مدل طراحی شده در شکل (۶) نشان داده شده است. برای مش بندی هواگرمن طراحی شده از مش بندی مکعبی استفاده شد. برای این کار فرآیند استقلال مش همانند نمونه‌های پیشین انجام شد که مدل مش بندی شده نهایی در شکل (۷) نشان داده شده است.

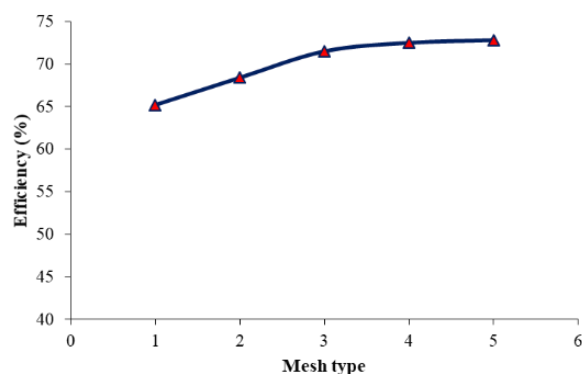


شکل ۶ مدل سه بعدی طراحی شده برای معادل سازی هواگرمن بررسی شده توسط هو و همکاران

جدول ۲ تعداد گره‌ها و المان‌های طراحی شده برای حالت‌های مش بندی مختلف

حالت	حالت	حالت	حالت	حالت	
اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	
تعداد گره	۳۲۱۶۱	۵۱۳۱۶	۳۷۵۸۹۰	۱۵۶۳۲۵۱	۱۸۸۰۱۰۷
تعداد المان	۱۸۷۵۶	۲۶۰۲۳۹	۲۰۵۸۸۴۲	۸۹۵۴۶۲	۱۰۱۷۴۶۹

مقدار بازده هواگرمن برای هرکدام از حالت‌های ذکر شده محاسبه شد، که در شکل (۴) نشان داده شده است.



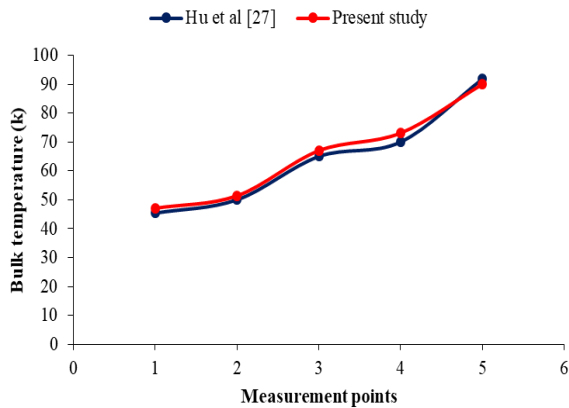
شکل ۴ مقایسه‌ی بازده با پنج نوع مش بندی مختلف

با بررسی شکل (۴) می‌توان دریافت که میزان بازده حرارتی در حالت‌های چهارم و پنجم تغییر چندانی نداشته است. زیرا هرچه مش بندی ریزتر می‌شود نرم‌افزار برای حل ازسری‌های نامتناهی استفاده می‌کند. در این سری‌ها عملیات گرد کردن اعداد صورت می‌گیرد و نرم‌افزار باید حجم محاسبات خود را افزایش دهد. بنابراین با گرد کردن اعداد در حجم محاسبات زیاد خطای بیشتری حاصل می‌شود.

در محاسبات عددی داشتن تعداد گره و المان بیشتر لزومی برداشتن جواب صحیح‌تر نمی‌باشد؛ بلکه احتمال خطا هم افزایش می‌یابد. بنابراین مش بهینه در این شبیه‌سازی، حالت سوم انتخاب شده است.

اعتبار سنجی. برای بررسی اعتبار مدل‌سازی و تأیید نتایج حاصل از این پژوهش، هواگرمن با ابعاد ذکر شده توسط هو و

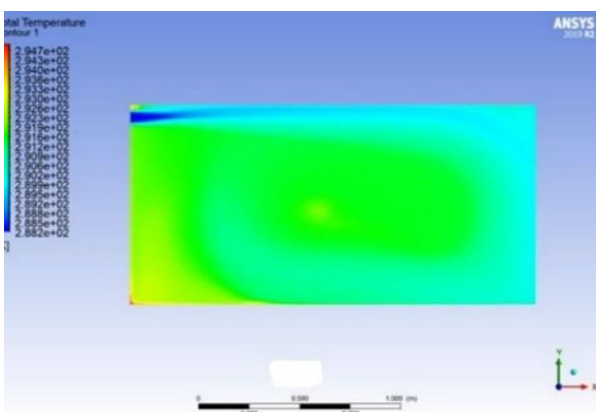
هواگرمن مقدار خیلی کمی می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که از نتایج شبیه‌سازی با اطمینان می‌توان برای استخراج کانتور و سایر پارامترهای هواگرمن استفاده کرد.



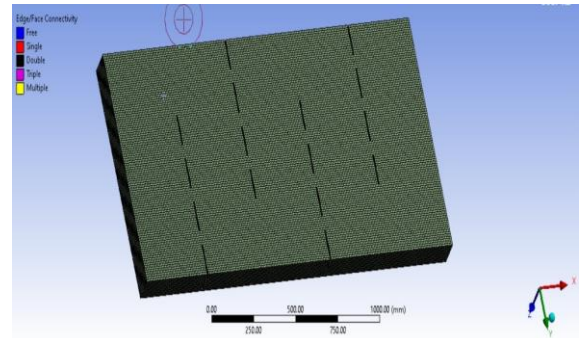
شکل ۹ مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش ارائه‌شده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران

تحلیل نتایج

نتایج شبیه‌سازی بدون بافل. پس از همگرا شدن مسئله تمامی کانتورهای دما، سرعت و جریان برای سه ورودی سرعت ۲، ۴، ۶ متر بر ثانیه استخراج شدند. شکل (۱۰) مقدار کانتورهای دمای استاتیک برای سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

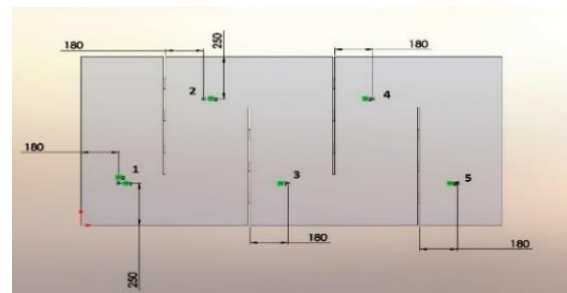


(الف)



شکل ۷ مدل مش بندی نهایی برای هواگرمن طراحی شده با مدل هو و همکاران

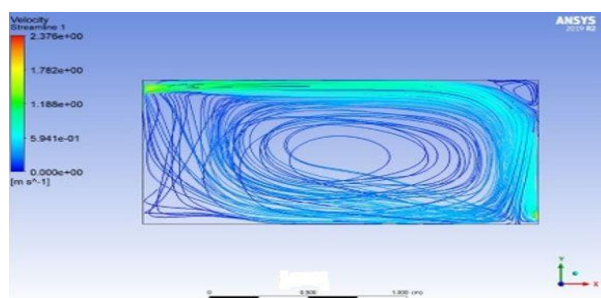
پس از مش بندی مدل و اعمال مقادیر ورودی برای سرعت‌های (۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه) و شرایط مرزی مسئله طبق نمونه‌های پیشین، نهایتاً مسئله حل شد و پارامترهای خروجی استخراج شد. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده ۵ نقطه در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل (۸) مشخص شد و میزان دمای بالک (Bulk temperature) برای این نقاط استخراج گردید.



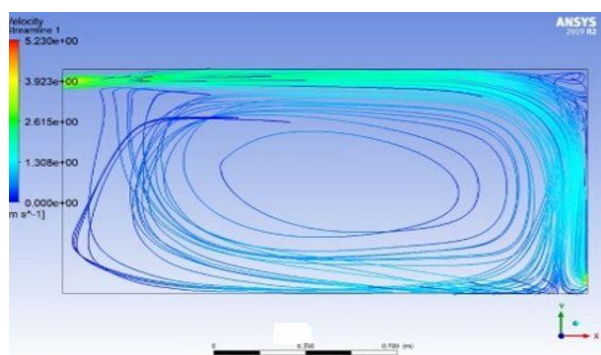
شکل ۸ موقعیت نقاط اندازه‌گیری دمای بالک

دمای بالک استخراج شده با مقادیر تجربی به دست آمده توسط هو و همکاران مقایسه شد که نتایج این بررسی مقایسه‌ای، در نمودار ارائه شده در شکل (۹)، ارائه شده است. همان‌طور که از این نمودار می‌توان مشاهده نمود، این مقادیر اختلاف کمی باهم دارند. نقطه‌ی ۱ همان ابتدای تیغه اول هست که دارای دما در حدود ۴۸ کلوین است و جریان با عبور از تیغه‌ها و رسیدن به انتهای هواگرمن (نقطه‌ی شماره ۵) گرم شده و دمای آن بالا می‌رود که میزان اختلاف دمای خروجی هواگرمن در حالت شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی استخراج شده توسط هو و همکاران کمتر از ۵ کلوین اختلاف دارد که با توجه به حجم

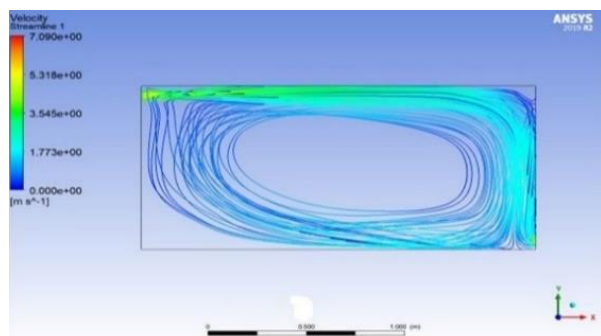
بنابراین با افزایش سرعت جریان ورودی، دمای خروجی و در نهایت بازده هواگرمن افزایش می‌یابد. به این علت که با افزایش سرعت ورودی، توربولانس جریان بیشتر شده و جریان چرخشی خود انرژی جنبشی جریان را بلابرده و در نهایت دمای سیال افزایش می‌یابد.



(الف)



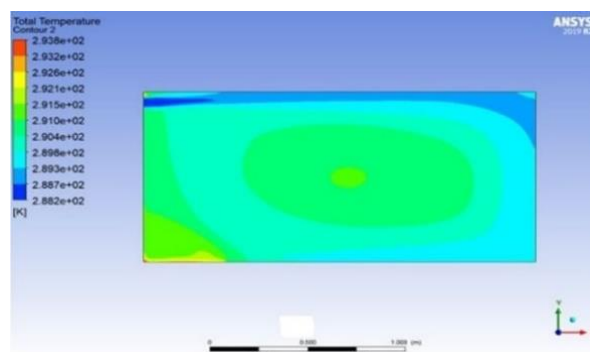
(ب)



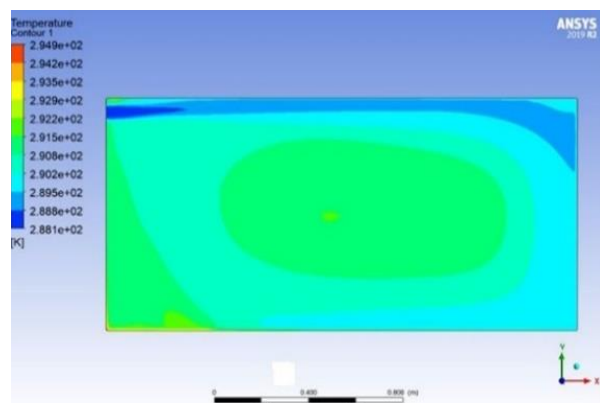
(ج)

شکل ۱۱ کانتورهای سرعت جریان برای سرعت‌های (الف) ۲ m/s، (ب) ۴ m/s و (ج) ۶ m/s

شکل (۱۲) نمودار تغییرات بازده حرارتی برای سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت از ۲ به ۳ متر بر ثانیه، تغییرات بازده محسوس و بسیار قابل توجه است، اما افزایش سرعت به مقادیر بیش از ۳ متر بر ثانیه، تأثیری قابل توجه روی میزان بازدهی ندارد.



(ب)



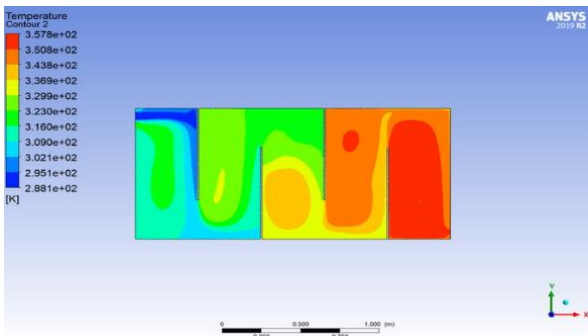
(ج)

شکل ۱۰ کانتورهای دمای استاتیک برای سرعت‌های (الف) ۲ m/s، (ب) ۴ m/s و (ج) ۶ m/s

برای به دست آوردن کانتور دمای استاتیک ابتدا یک صفحه ایزو در وسط میدان حل تعریف شد و کانتورهای دما و سرعت در این صفحه محاسبه شدند. علت تعریف این صفحه این است که تأثیرات کمتری از دیوارهای جانبی و بالایی و پایینی می‌پذیرد. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، مقادیر دمای استاتیک با تغییر سرعت ورودی تغییر چندانی نداشته است. اما مقادیر دما در سرعت ۶ متر بر ثانیه به نسبت بیشتر است بنابراین با افزایش سرعت، دمای هوای داخل هواگرمن بیشتر می‌شود.

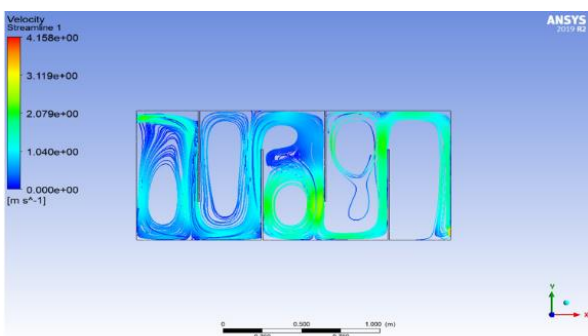
برای بررسی بیشتر این نتایج، کانتورهای سرعت در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان هوا پس از ورود به هواگرمن با سرعت ورودی به انتهای هواگرمن رسیده و پس از برخورد با دیواره شروع به چرخش می‌کند. هوا در ابتدا سمت پایین و قسمت وسط هواگرمن تقریباً ساکن مانده و در نتیجه دمای آن باید بیشتر باشد چراکه این مقدار هوا تحت تأثیر گرمای بیشتری است. این موضوع در کانتورهای دمای استاتیک در شکل (۱۰) نیز آمده است.

چرخش شده و توربولانس ایجاد می‌شود [27-29].



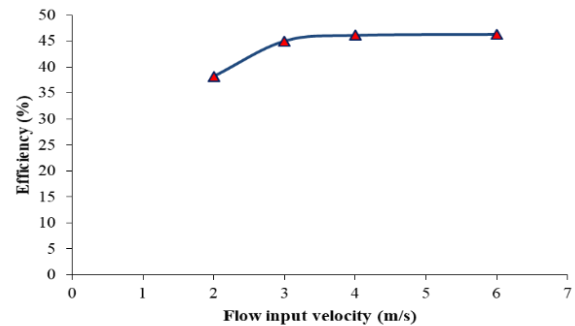
شکل ۱۴ کانتور دما در حالت چهار بافل

شکل (۱۵) کانتور بردار جریان را نشان می‌دهد. با استفاده از کانتور بردارهای جریان می‌توان میزان چرخش جریان و نحوه عبور جریان از بین صفحات را مشاهده کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین سرعت در ورودی و خروجی و بیشترین چرخش جریان در نواحی دور از ورودی صفحات و در پشت صفحات بافل اتفاق افتاده است [۲۷، ۳۰]. در پشت هرکدام از صفحات کمترین سرعت جریان وجود داشته و به اصطلاح سکون جریان اتفاق می‌افتد.



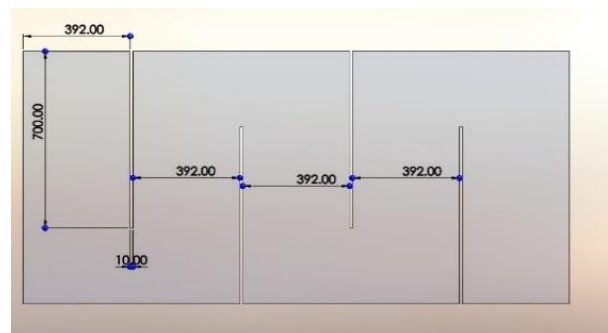
شکل ۱۵ کانتور سرعت جریان در حالت چهار بافل

با در نظر گرفتن تغییر در تعداد تیغه‌های بافل و بافل‌هایی به تعداد ۹، ۸، ۶، ۳، ۲ در نظر گرفته شد و فرآیندهای استقلال مش برای هرکدام از این حالت‌ها انجام شد و مقادیر خروجی دما و بازده هواگرمن استخراج شد. شکل (۱۶) کانتورهای دمای استاتیک را برای تعداد بافل‌های متفاوت نشان می‌دهد. با بررسی کانتورها مشاهده می‌شود که در حالت ۹ بافل یا همان حالت (د)، یکنواختی دما بیشتر است یا به اصطلاح جریان یکنواخت‌تر است،



شکل ۱۲ تغییرات بازده نسبت به سرعت ورودی

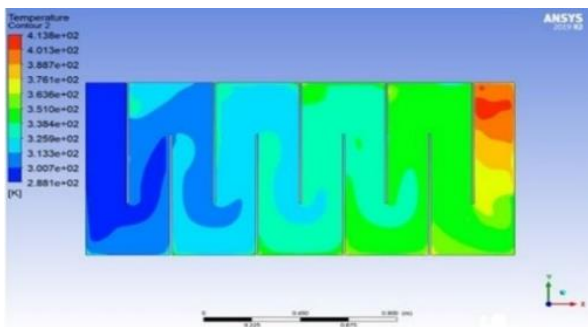
تغییرهندسی جهت افزایش بازده. در این حالت با ایجاد بافل با تعدادهای متعدد میزان تأثیر این بافل‌ها بر بازدهی و میزان افت فشار هواگرمن بررسی می‌شود. در مرحله اول تعداد ۴ بافل با ضخامت ۱ سانتی‌متر برای هندسه حل در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۳) هندسه طراحی شده را نشان می‌دهد. پس از طراحی بافل‌ها نهایتاً هندسه-ی طراحی شده مش‌بندی شد و فرآیند استقلال مش برای آن انجام گرفت و مش بهینه انتخاب گردید.



شکل ۱۳ طراحی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با چهار بافل

با در نظر گرفتن سرعت ورودی ۳ متر بر ثانیه برای ورودی و اعمال تمامی شرایط پیشین حل اجرا شد، که در ادامه نتایج استخراج شده ارائه شده‌اند.

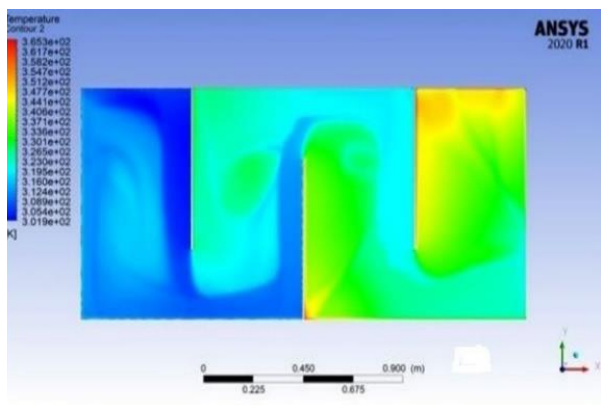
شکل (۱۴) کانتور استخراج شده برای دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت دمای هواگرمن افزایش داشته است. به طوری که دما نسبت به حالت بدون بافل در حدود ۵۰ درجه افزایش داشته است. دلیل افزایش دما این است که با اضافه کردن تعداد بافل‌ها مقادیر و یک‌های جریان افزایش داشته است؛ و جریان در پشت هرکدام از صفحات دچار



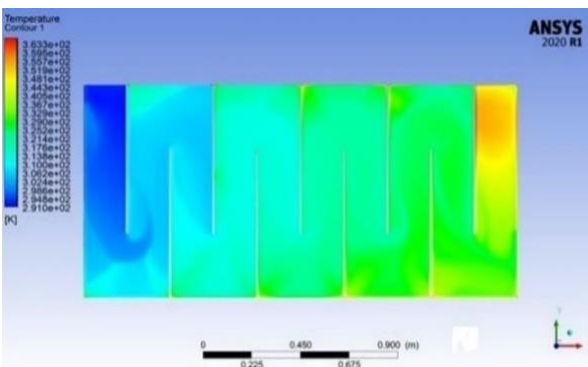
(ه)

شکل ۱۶ کانتورهای دما، (الف) دوبافل، (ب) سه بافل، (ج) شش بافل، (د) هشت بافل و (ه) نه بافل

شکل (۱۷) کانتورهای دما در سطح پوشش شیشه‌ای برای حالت ۳ بافل و ۹ بافل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در حالت ۹ بافل میانگین دما نسبت به حالت ۳ بافل بیشتر است که علت افزایش دما منجر به اتلاف حرارتی بیشتر ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.



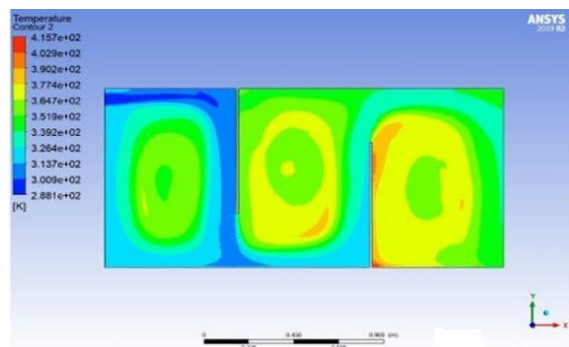
(الف)



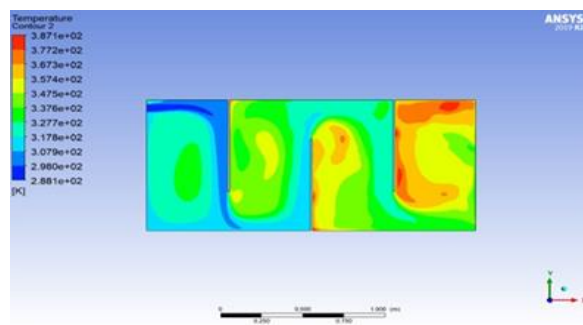
(ب)

شکل ۱۷ دمای استاتیک در سطح پوشش شیشه‌ای برای حالت (الف) سه بافل، (ب) نه بافل

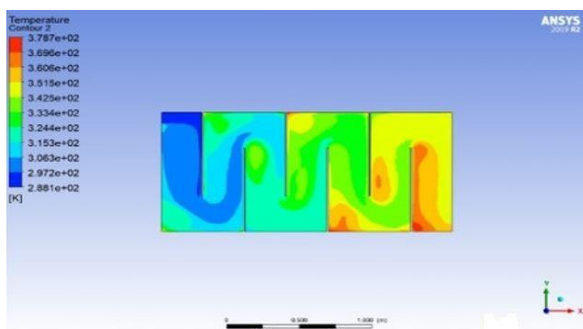
اما در بافل آخر دمای سیال در پشت بافل بالا رفته است که دلیل آن این است که جریان پس از عبور از بافل گرم شده و مقداری از این جریان گرم شده در پشت بافل آخر به دام می‌افتد و شروع به چرخش می‌کند و به مرور دمای آن بالا می‌رود.



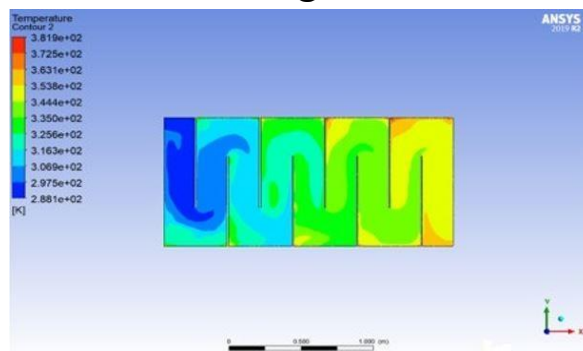
(الف)



(ب)

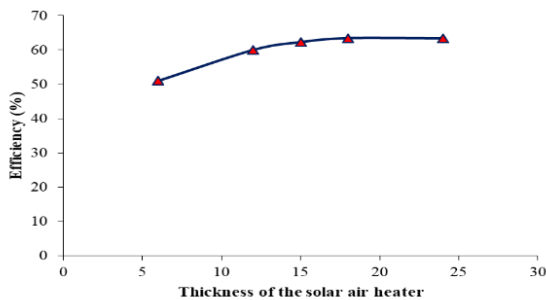


(ج)



(د)

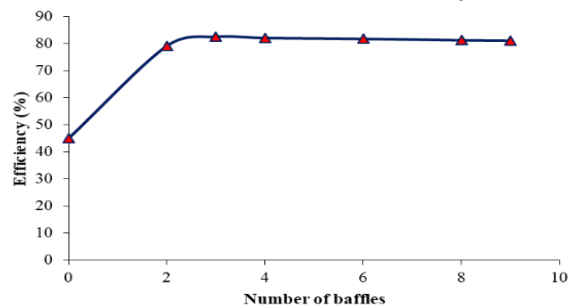
به صورت ۱۸، ۱۵، ۱۲، ۶ و ۲۴ سانتی متر در نظر گرفته شد. معادلات حاکم برای هر یک از این حالت‌ها در نظر گرفته شد و میزان بازده حرارتی استخراج شد. شکل (۲۰) تغییرات بازده نسبت به تغییر فاصله هوایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش ضخامت کلکتور ابتدا بازده افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد. با افزایش ضخامت کلکتور فضای بیشتری برای انتقال حرارت جابه‌جایی ایجاد می‌شود و فاصله شیشه و صفحه جاذب هم افزایش می‌یابد و میزان اتلاف حرارت تشعشعی به میزان ناچیزی کم می‌شود. با افزایش ضخامت کلکتور و بزرگ‌تر شدن فضا، مشکل ایزوله کردن این فضا و جلوگیری از اتلاف حرارتی پیش می‌آید که در این حالت ضخامت هواگر مکن بین ۱۵ تا ۱۸ سانتی متر بهترین گزینه می‌باشد.



شکل ۲۰ تغییرات بازده نسبت به ضخامت کلکتور

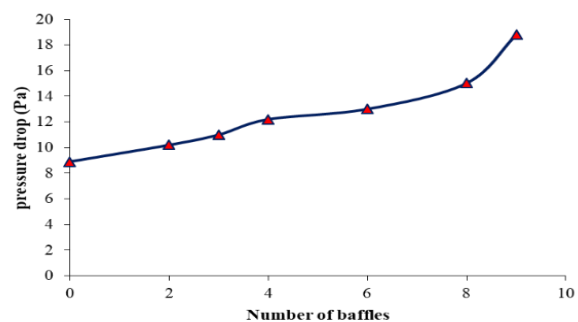
تأثیر تغییر ضخامت شیشه روی بازده. تأثیر ضخامت شیشه و یا به اصطلاح چند جداره کردن شیشه بر روی عملکرد هواگر مکن مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار هواگر مکن با ۳ بافل با استفاده از شیشه‌ی تک جداره و دو جداره شبیه‌سازی شد. مقادیر کانتورهای استخراج شده برای دما در شکل (۲۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است میزان افزایش دما در حالت دو جداره بیشتر از حالت تک جداره است [31-32]. بنابراین ضریب هدایت حرارتی در حالت دو جداره خیلی کمتر از حالت تک جداره بوده و میزان اتلاف حرارت جابه‌جایی در حالت دو جداره به مراتب کمتر از حالت شیشه‌ی تک جداره است. همان‌طور که مشخص است جریان در حالت دو جداره نسبت به حالت تک جداره، مقداری یکنواخت‌تر است.

شکل (۱۸) بازده حرارتی در تعداد بافل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشترین بازده مربوط به حالت ۳ بافل است چراکه میانگین دمای سطح شیشه، میانگین دمایی در صفحه میانی و توربولانس جریان در این حالت نسبت به سایر حالت‌ها عملکرد بهتری داشته است. این نمودار نشان می‌دهد که راندمان در حالت ۳ بافل به مقدار ۸۲/۴۸ درصد است و در حالت ۴ بافل به مقدار ۸۲/۰۵ درصد و با افزایش تعداد بافل‌ها از میزان عملکرد هواگر مکن کاسته می‌شود. دلیل آن را میزان افزایش دما در سطح شیشه، میزان افزایش توربولانس جریان و افت فشار را می‌توان بیان کرد.



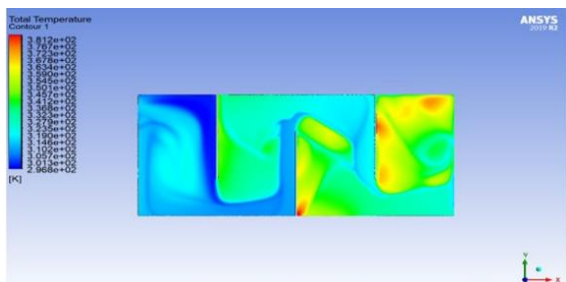
شکل ۱۸ تغییرات بازده در برابر تعداد بافل

نمودار افت فشار نسبت به تعداد بافل در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد بافل - ها میزان افت فشار افزایش می‌یابد [27]. به این دلیل که با افزایش تعداد بافل‌ها میزان مقاومت جریان بیشتر شده و در نتیجه اختلاف فشار ورودی با فشار خروجی افزایش یافته که نتیجه‌ی آن افزایش افت فشار در هواگر مکن می‌شود.



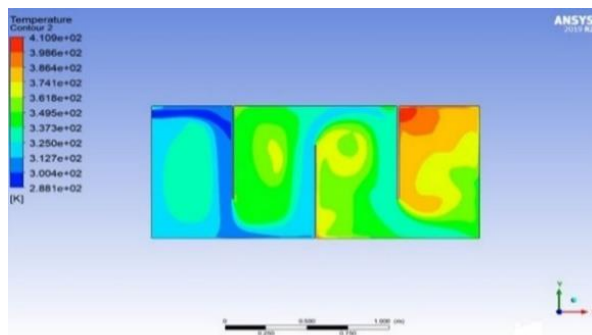
شکل ۱۹ تغییرات افت فشار نسبت به تعداد بافل‌ها

بررسی تغییر فاصله‌ی هوایی هواگر مکن بر بازده. برای بررسی تأثیر فاصله‌ی هوایی از شیشه تا صفحه جاذب مقادیر این فاصله

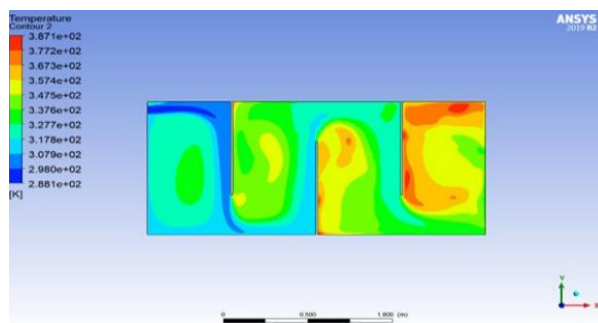


(ب)

شکل ۲۲ کانتور دمای استاتیک در سطح شیشه، الف) تک جداره و (ب) دو جداره



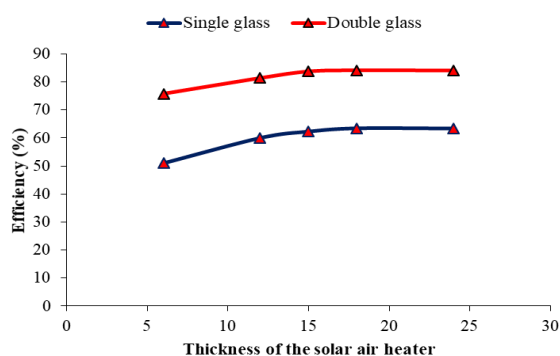
(الف)



(ب)

شکل ۲۱ کانتور دمای استاتیک، الف) شیشه دو جداره، ب) شیشه تک جداره

تأثیر فاصله هوایی بین شیشه و صفحه جاذب در حالت تک جداره و دو جداره مورد بررسی قرار گرفت و نمودار تغییرات بازده برای این حالت در شکل (۲۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، میزان بازده در حالت دو جداره به مراتب بیشتر از حالت تک جداره است؛ زیرا در حالت دو جداره دمای خروجی به مراتب بیشتر و توربولانس کمتری در جریان وجود دارد. بنابراین انتقال حرارت در این حالت بیشتر بوده و در نهایت در این حالت اتلاف حرارت کمتر است.

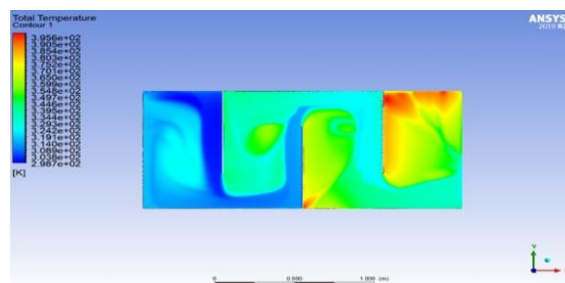


شکل ۲۳ نمودار تغییرات بازده نسبت به فاصله هوایی برای هواگرمن با شیشه تک جداره و دو جداره

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هواگرمن خورشیدی صفحه تخت باهدف بهینه کردن انرژی برداشت شده از هواگرمن با استفاده از آرایش‌های هندسی مختلف و یافتن بهینه‌ترین حالت، با روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی هندسه با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک انجام شد و سپس این مدل جهت ادامه‌ی فرآیند مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل، وارد نرم‌افزار انسیس شد. پس از تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه مناسب و یافتن

کانتور دمای استاتیک در سطح شیشه برای هر دو حالت تک جداره و دو جداره در شکل (۲۲) نشان داده شده است. میزان دما در سطح شیشه در حالت دو جداره مقداری بیشتر از حالت تک جداره است؛ اما از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی در این حالت نسبت به حالت تک جداره به مراتب کمتر است؛ بنابراین اتلاف در این حالت به مراتب از حالت تک جداره کمتر می‌باشد. بنابراین بیشتر گرما از طریق تشعشع و جابه‌جایی به سطح جاذب رسیده و نهایتاً دما افزایش می‌یابد.



(الف)

اقتصادی، ارزیابی چرخه عمر و اثرات زیست محیطی مواد و عوامل مورد استفاده در سیستم از دیگر کارهای آینده است.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
مساحت، m^2	A
گرمای ویژه در فشار ثابت،	C_p
$j/kg \cdot k$	
شدت تابش خورشیدی، w/m^2	G
هدایت حرارتی، $w/m \cdot k$	K
دبی جریان، kg/s	\dot{m}
دما، k	T
زمان، s	t
علائم یونانی	
چگالی، kg/m^3	ρ
لزجت، $kg/m \cdot s$	μ
ضریب استفان بولتزمن $\frac{w}{m^2k^4}$	σ

واژه نامه

دمای بالک	Bulk temperature
دینامیک سیالات محاسباتی	CFD
الگوریتم کوپل شده	Coupled
مدل مجزا سازی معادلات	DO
هوا گرم کن خورشیدی	FPSAH
صفحه تخت	
حل کننده مبتنی بر فشار	Pressure Base
الگوریتم سیمپل	SIMPLE
نرم افزار سالیدورکس	Solid Works
سرعت ورودی	Velocity Inlet

تقدیر و تشکر

مش بهینه بر اساس بررسی پارامترهای مختلف، مسئله در حالت-ها و هندسه‌های مختلف حل شد. در نهایت پس از ساخت یک مدل معادل با مدل آزمایشی ارائه شده در پژوهش لیو و همکاران، اعتبارسنجی روش ارائه شده، انجام گردید. مهمترین نتایج این پژوهش به صورت خلاصه‌ی زیر حاصل شد:

- با افزایش سرعت جریان ورودی، دمای خروجی و در نهایت، بازده هواگرمکن افزایش یافت.
 - افزایش سرعت جریان ورودی از ۳ متر بر ثانیه به بالا، تغییر قابل توجهی در بازدهی هواگرمکن ایجاد نمی‌کند.
 - برای حالت وجود ۴ بافل، میزان بازدهی هواگرمکن نسبت به حالت بدون بافل، حدود ۵۰ درصد افزایش یافت.
 - در حالت هواگرمکن با حضور بافل، بیشترین سرعت جریان در ورودی و خروجی و کمترین سرعت جریان به علت وجود جریان گردشی، در پشت صفحات اتفاق می‌افتد.
 - یکنواختی دما برای حالت ۹ بافل، بیشتر بوده و جریان در این حالت، یکنواخت تر است. بیشترین میزان بازدهی کلی، مربوط به وجود سه بافل در هواگرمکن بود که بازده حدود ۸۲ درصد حاصل شد.
 - افزایش بیش از ۳ عددی بافل‌ها، منجر به افزایش افت فشار می‌شود. به این دلیل که با افزایش تعداد بافل‌ها میزان مقاومت جریان بیشتر شده و در نتیجه اختلاف فشار ورودی با فشار خروجی افزایش یافته که نتیجه‌ی آن افزایش افت فشار در هواگرمکن می‌شود.
 - بهینه‌ترین ضخامت برای کلکتور، ضخامت حدود ۱۵ الی ۱۸ سانتی‌متر حاصل شد. میزان بازده در حالت شیشه‌ی دوجداره، بیشتر از حالت تک جداره است.
- بر اساس نتایج و یافته‌های مطالعه و مقایسه با سایر کارهای مشابه، یکی از چالش‌های اصلی سیستم‌های حرارتی مختلف به ویژه هواگرمکن‌های خورشیدی به حداکثر رساندن راندمان حرارتی است. در سیستم حاضر، هوای محیط با برخورد با بافل‌های متعدد و استفاده همزمان از شیشه دو جداره دمای خروجی به حداکثر رسیده است.

بنابراین ساخت سیستم حاضر می‌تواند در سیستم‌های خشک‌کن خورشیدی، آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، اجاق خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ساخت و بررسی تجربی سیستم حاضر متصل به خشک‌کن خورشیدی، تحلیل

مراجع

- [1] M. S. Barghi Jahromi and M. Iranmanesh, "Experimental investigation on the use of PCM in a pistachio solar dryer by the evacuated heat pipe solar collector," *Journal of Pistachio Science and Technology*, vol. 3, pp. 73-87, 2019.
- [2] M. S. B. Jahromi, V. Kalantar, M. Sefid, H. S. Akhijahani, and M. Iranmanesh, "Energy and exergy analysis of an unglazed transpired collector connected to a dryer with a porous plate and phase change material," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, p. 106693, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106693>
- [3] M. Yang, X. Yang, X. Li, Z. Wang, and P. Wang, "Design and optimization of a solar air heater with offset strip fin absorber plate," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1349–1362, Sep, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.091>
- [4] M. A. Wazed, Y. Nukman, and M. T. Islam, "Design and fabrication of a cost effective solar air heater for Bangladesh," *Applied Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3030–3036, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.014>
- [5] N. Varun and N. Siddhartha, "Thermal performance optimization of a flat plate solar air heater using genetic algorithm," *Applied Energy*, vol. 87, no. 5, pp. 1793–1799, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.015>
- [6] R. S. Gill, S. Singh, and P. P. Singh, "Low cost solar air heater," *Energy Conversion and Management*, vol. 57, pp. 131–142, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.019>
- [7] M. Ahmadi, H. Samimi-Akhijahani, and P. Salami, "Thermo-economic and drying kinetic analysis of Oleaster using a solar dryer integrated with phase change materials and recirculation system," *Journal of Energy Storage*, vol. 68, p. 107351, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107351>
- [8] M. B. Jahromi, V. Kalantar, and M. Abdolrezaie, "Experimental study of effect of storage phase change materials (PCM) on the function of a passive solar ventilator," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 1709–1717, 2020. (In Persian) <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1399.20.7.23.6>
- [9] M. S. B. Jahromi, V. Kalantar, and H. Samimi-Akhijahani, "Evaluation of performance, energy, and exergy analysis of a solar parabolic dish collector connected to a dryer with nanofluid and PCM," *Journal of Energy Storage*, vol. 98, p. 112969, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112969>
- [10] C. D. Ho, H. M. Yeh, T. W. Cheng, T. C. Chen, and R. C. Wang, "The influences of recycle on performance of baffled double-pass flat-plate solar air heaters with internal fins attached," *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1470–1478, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.013>
- [11] W. Gao, W. Lin, T. Liu, and C. Xia, "Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters," *Applied Energy*, vol. 84, no. 4, pp. 425–441, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.02.005>
- [12] R. Fattoum, A. Hidouri, M. E. H. Attia, M. Arici, and M. A. Abbassi, "Optimization of solar air heaters performance using parallel porous wire mesh: energy, exergy, and enviro-economic analyses," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 48, p. 102385, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102385>
- [13] V. Singh, V. S. Yadav, V. Trivedi, M. Kumar, and N. Kumar, "Application of response surface methodology for analysing and optimizing the Finned solar air heater," *Journal of Thermal Science*, vol. 33, pp. 985–1009, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11630-024-1934-z>

- [14] V. S. Korpale, S. P. Deshmukh, C. S. Mathpati, and V. H. Dalvi, "Numerical simulations and optimization of solar air heaters," *Applied Thermal Engineering*, vol. 180, p. 115744, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115744>
- [15] M. S. B. Jahromi, V. Kalantar, M. Sefid, M. Iranmanesh, and H. Samimi Akhijahani, "Thermofluid Numerical simulation of the flat solar heating transpired collector for drying purposes," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 1, pp. 61-80, 2022. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115744>
- [16] H. Parsa, M. Saffar-Avval, and M. R. Hajmohammadi, "3D simulation and parametric optimization of a solar air heater with a novel staggered cuboid baffles," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 205, p. 106607, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106607>
- [17] M. S. W. Potgieter, C. R. Bester, and M. Bhamjee, "Experimental and CFD investigation of a hybrid solar air heater," *Solar Energy*, vol. 195, pp. 413–428, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.058>
- [18] A. Heydari and M. Mesgarpour, "Experimental analysis and numerical modeling of solar air heater with helical flow path," *Solar Energy*, vol. 162, pp. 278–288, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.030>
- [19] M. Akhbari, A. Rahimi, and M. S. Hatamipour, "Modeling and experimental study of a triangular channel solar air heater," *Applied Thermal Engineering*, vol. 170, p. 114902, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114902>
- [20] A. E. A. Abdulmejeed, A. D. Tuncer, A. Khanlari, and A. Gungor, "Investigation of combined parallel and triple-pass v-corrugated solar air heater: A numerical and experimental study," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 185, pp. 1385–1398, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.107>
- [21] J. S. Prasad, A. Datta, and S. Mondal, "Flow and thermal behavior of solar air heater with grooved roughness," *Renewable Energy*, vol. 220, p. 119698, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119698>
- [22] M. Iranmanesh, H. S. Akhijahani, and M. S. B. Jahromi, "CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1192–1213, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>
- [23] M. S. B. Jahromi, V. Kalantar, H. S. Akhijahani, H. Kargarsharifabad, and S. Shoeibi, "Performance analysis of a new solar air ventilator with phase change material: Numerical simulation, techno-economic and environmental analysis," *Journal of Energy Storage*, vol. 62, p. 106961, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106961>
- [24] M. S. Barghi Jahromi, V. Kalantar, and M. Omidpanah, "Numerical Simulation of Indirect Cabinet Solar Dryer by spraying of Water Droplets in Yazd Climate," *Karafan Quarterly Scientific Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 523-544, 2022. (In Persian). <https://www.doi.org/10.48301/KSSA.2021.292394.1594>
- [25] M. S. Barghi Jahromi, M. Iranmanesh, and H. S. Akhijahani, "Thermo-Economic evaluation of a solar dryer with evacuated heat pipe collector and energy storage," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 39-58, 2021. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jacsm.2021.56640.0>
- [26] H. S. Akhijahani, P. Salami, M. Iranmanesh, and M. S. B. Jahromi, "Experimental study on the solar drying of Rhubarb (*Rheum ribes L.*) with parabolic trough collector assisted with air recycling system, nanofluid and energy

- storage system," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, p. 106451, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106451>
- [27] J. Hu, K. Liu, L. Ma, and X. Sun, "Parameter optimization of solar air collectors with holes on baffle and analysis of flow and heat transfer characteristics," *Solar Energy*, vol. 174, pp. 878–887, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.075>
- [28] C.-E. Bensaci, A. Moumami, F. J. S. De La Flor, E. A. R. Jara, A. Rincon-Casado, and A. Ruiz-Pardo, "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, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.017>
- [29] S. Tamna, S. Skullong, C. Thianpong, and P. Promvong, "Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators," *Solar Energy*, vol. 110, pp. 720–735, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.020>
- [30] S. Sharma, R. K. Das, and K. Kulkarni, "Computational and experimental assessment of solar air heater roughened with six different baffles," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 27, p. 101350, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101350>
- [31] A. Subiantoro and K. T. Ooi, "Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 392–399, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.009>
- [32] R. Vaziri, M. Ilkan, and F. Egelioglu, "Experimental performance of perforated glazed solar air heaters and unglazed transpired solar air heater," *Solar Energy*, vol. 119, pp. 251–260, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.043>