

## شبیه‌سازی عددی هواگرمکن خورشیدی صفحه تخت با تأثیر جاذب بهینه و شیشه دوجداره

علی زنگنه اینالو؛ محمد سفید؛ محمد صالح برقی جهرمی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

دانشجو دکتری تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

**چکیده** هواگرم کن‌های 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 هواگرمکن‌های 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 هواگرمکن‌های خورشیدی با هزینه کم می‌باشد، بنابراین در این پژوهش عددی سعی بر این است که تغییرات هندسی ایجادشده بر روی هواگرمکن 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 هواگرمکن، دمای خروجی و در نتیجه بازده کلی هواگرمکن افزایش می‌یابد. ماکزیمم میزان بازده حرارتی به مقدار ۸۲ درصد مربوط به وجود سه بافل در هواگرمکن خورشیدی بود. همچنین افزایش بیش از ۳ عددی بافل‌ها، منجر به افزایش افت فشار می‌شود. نتایج بهینه‌سازی تغییر فاصله هوایی (ضخامت) و شیشه تک و دوجداره نشان می‌دهد که بهینه‌ترین ضخامت برای هواگرمکن خورشیدی صفحه تخت، ضخامت حدود ۱۵ الی ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد. بازده حرارتی شیشه دوجداره ۲۰ درصد از حالت تک‌جداره بیشتر است.

**کلمات کلیدی** انرژی خورشیدی، هواگرمکن خورشیدی صفحه تخت، بازده حرارتی، صفحه جاذب بهینه، شیشه دو جداره

### **Numerical simulation of flat plate solar air heater with optimal absorber effect and double glazed glass**

**Abstract** flat plate solar air heaters have become very popular for use in space heating as well as industrial processes due to their low construction cost and easy maintenance compared to other collectors. One of the most important disadvantages of solar air heaters is their low thermal performance. Because using extended surfaces on the absorber, using thicker glass, using porous media and geometric changes on the absorber plate (waving the absorber plate with different patterns) are ways to improve heat transfer and thermal performance of the air heater. Solar heaters are low-cost, so in this numerical study, an attempt is made to investigate the geometrical changes created on the solar air heater with the computational fluid dynamics method, compare the result with the conducted researches, and select the optimal mode. The results show that by adding a number of baffles to the air heater, the outlet temperature and as a result, the thermal efficiency of the air heater increases. The maximum thermal efficiency of 82% was related to the presence of three baffles in the solar air heater. In addition, an increase of more than 3 baffles leads to an increase in pressure drop. The results of optimizing the change of air gap (thickness) and single and double glass show that the most optimal thickness for a 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.

**Keywords** Solar Energy, Flat Plate Solar Air Heater, Thermal Efficiency, Optimal Absorber Plate, Double Glass

مطالعات جدیدی برای افزایش راندمان هواگرمن‌های خورشیدی انجام شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. فاتوم و همکاران به بهینه سازی 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 [۱۲]. سینگ و همکاران به بهینه سازی یک هوا گرمن خورشیدی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که راندمان حرارتی ۵۰/۸۹ درصد و راندمان آگرژی ۸/۷۶ درصد بدست می‌آید [۱۳]. کورپل و همکاران یک هوا گرمن خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دادند و پارامتر عملکرد ترموهیدرولیک را برای باله‌های مستطیلی بررسی کردند. حداکثر عملکرد ترموهیدرولیک ۲/۷۷ برای عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ با گام ۱۷/۲۲ به دست آمد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شبیه سازی انجام شده مطابقت خوبی با داده های تجربی دارد [۱۴]. برقی جهرمی و همکاران به شبیه سازی یک هواگرمن خورشیدی مشبک متصل به خشک کن خورشیدی پرداخت. 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 [۱۵]. 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 ذخیره کننده حرارتی بازده آگرژی حدوداً ۶ درصد افزایش یافته است. بیشترین بازده حرارتی

هواگرمن‌های خورشیدی صفحه تخت<sup>۱</sup> (FPSAH) 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 فضاها، داخلی ساختمان، کم آبی محصولات صنعتی و خشک کردن محصولات کشاورزی و گیاهان دارویی اشاره کرد [۳-۱]. 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 با راندمان بالا بر اساس تحلیل حساسیت پارامترهای بحرانی، از دیدگاه مواد، توسعه یافته است؛ برای این منظور از صفحه جذب از جنس آهن [۴-۵]، فایبرگلاس به رنگ مشکی [۶] و از جنس استیل [۷] استفاده شده است. همچنین بهینه‌سازی ساختار هواگرمن در مطالعات محققان به صورت استفاده از صفحه جذب با هندسه مخروطی [۸]، استفاده از صفحه جذب از جنس مس به صورت کوئل مارپیچ [۹]، استفاده از صفحه جذب به صورت دو مسیر و قرار دادن بافل در مسیر اول و تیغه در مسیر دوم [۱۰] و استفاده از صفحه جذب موجدار [۱۱] 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 [۳-۲].

<sup>1</sup> Flat Plate Solar Air Heater

هواگرمن به مقدار ۴۵/۹۲ درصد است [۲]. پارسا و همکاران یک هواگرمن خورشیدی با بافل‌های مکعبی را شبیه سازی و بهینه سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که بالاترین عملکرد ترموهیدرولیک با مقدار ۳/۴۳ برای عدد رینولدز ۵۰۸۰ به دست آمد [۱۶]. پانگیتیر 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 [۱۷]. حیدری و مسگریور 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 [۱۸]. 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 [۱۹].

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 حالت-های مختلف) و بدون پره، تغییرفاصله هوایی (۶، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۴ سانتی متر) و تأثیر شیشه تک جداره و دو جداره به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. کانتورهای 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.

## ۲- مدل سازی عددی

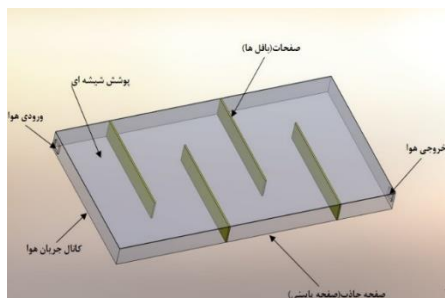
برای بررسی عملکرد هواگرمن خورشیدی ابتدا باید معادلات حاکم بر جریان در آن را شناخت. همچنین جهت ساده‌سازی معادلات حاکم و همچنین افزایش سرعت محاسبات، می‌بایست فرضیاتی را در نظر گرفت که در ادامه ذکر می‌شوند. معادلات حاکم بر جریان عبارت‌اند از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی، اما از آنجایی که در هواگرمن 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.

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

۱- انتقال حرارت از کف هواگرمن ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

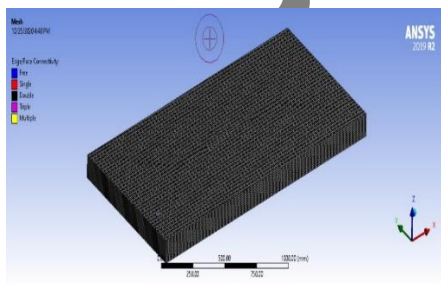
۲- اتلاف گرما از ورودی و خروجی هواگرمن ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

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.



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 آزمایشات 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.



<sup>3</sup> ANSYS workbench 2.0 framework version 19.0.0

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 سه بعدی هواگرمن، طراحی شود. بدین منظور از نرم افزار سالیدورک<sup>۲</sup>، استفاده شده است. سپس جهت اعمال شرایط مرزی و اولیه، مش بندی، حل مسئله، استخراج نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها این مدل سه بعدی وارد نرم افزار انسیس فلونت<sup>۳</sup> می‌شود. در این پژوهش، جریان مغشوش، غیرقابل تراکم، سه بعدی 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 [۲۰-۲۱]. 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

<sup>2</sup> Solid Works, version 18.0.0

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.

جدول ۱- مشخصات هواگرمن خورشیدی صفحه

تخت در این پژوهش

مشخصات (ابعاد و اندازه)	اجزاء هواگرمن خورشیدی
هواگرمن خورشیدی با ابعاد $0.12 \times 1 \times 2$ متر است.	صفحه تخت
جریان از قسمت ورودی که یک دریچه مربعی $60 \times 60$ میلی متر است، وارد و از سمت دیگر آن خارج می شود.	صفحه جاذب
صفحه‌ی بالایی از جنس شیشه با ضخامت ۴ میلی متر و صفحه‌ی پایینی از جنس آلومینیوم دارای ضریب جذب مشخص است.	دریچه هوای ورودی
	شیشه

۳- مبانی تئوری روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

مدل سازی هواگرمن خورشیدی صفحه تخت با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی با سه معادله اصلی شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتوم و انرژی انجام شد. [۲۲-۲۴]. از آنجایی که جریان با سرعت پایین جریان دارد و عدد ماخ پایین است پس می توان جریان را به صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفت. بر این اساس، معادله‌ی پیوستگی به صورت زیر خلاصه می شود:

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

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

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

که در این معادلات  $\rho$  چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب) جریان،  $\mu$  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 می توان 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 (کلوین)،  $k$  هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین) هستند. همچنین میزان آنتالپی در کلکتور را نیز به صورت زیر می توان تعریف کرد:

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

که در رابطه (۴)،  $C_p$  گرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم کلوین) و  $T_{ref}$  دمای مرجع هست که برابر  $300$  کلوین در نظر گرفته شده است.

از مدل مجزا سازی معادلات<sup>۴</sup> برای مدل سازی تشعشع جهت انتقال حرارت بین جاذب، شیشه و دیواره استفاده می شود. مجزا سازی، معادلات انتقال تشعشع را برای گره و المانها در نظر می گیرد. معادلات انتقال تشعشعی برای جذب، تشعشع و پخش برای یک موقعیت اختیاری  $\vec{r}$  در یک محدوده در جهت  $\vec{s}$  می توان نوشت.

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

$$d\Omega' \nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + \quad (5)$$

$$(a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = a n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} +$$

$$\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}')$$

که در رابطه (۵)،  $\vec{r}$  بردار موقعیت،  $\vec{s}$  بردار جهت،  $\vec{s}'$  بردار جهت پراکندگی،  $a$  ضریب جذب،  $a$  شاخص انعکاس،

$\sigma_s$  ضریب پخش،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن،  $I$  شدت تشعشع،  $T$  دمای محلی،  $\varphi$  تابع فاز،  $\Omega'$  زاویه جسم هستند.

اثر ویسکوزیته سیال، شناوری و آشفته‌گی باید برای فرآیند شبیه‌سازی در نظر گرفته شود تا تصویر دقیقی از توزیع هوا و انتقال حرارت از طریق سیستم هواگرمدکن خورشیدی صفحه تخت بدست آید. مدل K-epsilon یکی از قابل اعتمادترین مدل‌هایی است که وجود دارد. مدل دارای دو معادله انتقال است که پدیده آشفته در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۵</sup> را توصیف می‌کند. مدل K-epsilon به عنوان مدل مرفقی 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 [۱۶]:

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

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

که در آن  $\sigma_\varepsilon$  و  $\sigma_k$  اعداد پراوتل برای  $k$  و  $\varepsilon$ ،  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_{3\varepsilon}$  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<sup>۶</sup> استفاده شد، چرا که در مسائلی که دارای جریان‌های توربولانسی هستند استفاده از این روش منجر به حصول بهینه‌ترین جواب می‌شود [۲۲-۲۳]. برای حل معادلات مومنتوم و پیوستگی از حل‌کننده‌ی مبتنی بر فشار<sup>۷</sup> استفاده شد. برای

الگوریتم حل از الگوریتم کوپل شده<sup>۸</sup> 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.

### ۳-۱- 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<sup>۹</sup> استفاده شده است. سرعت‌های مرزی ۲، ۴ 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 هواگرمدکن 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<sup>۱۰</sup> استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات سیال عامل و شرایط مرزی

مکان	نوع شرایط مرزی	خواص
ورودی	Velocity Inlet	-
خروجی	Pressure Outlet	-
صفحه	Heat Flux	$\varepsilon_c = 0.1$

<sup>8</sup> Coupled

<sup>9</sup> Velocity Inlet

<sup>10</sup> ANSYS Meshing

<sup>5</sup> CFD

<sup>6</sup> SIMPLE

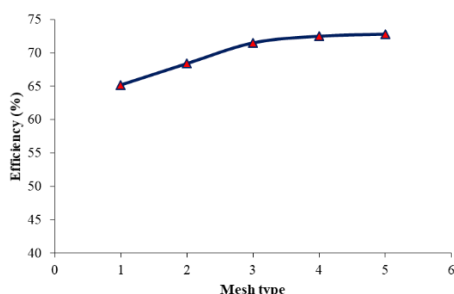
<sup>7</sup> Pressure Base

جدول ۲- تعداد گره‌ها و المان‌های طراحی شده برای

حالت‌های مش بندی مختلف

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

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



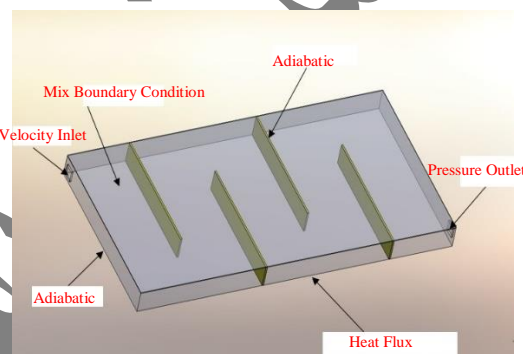
شکل ۴- مقایسه‌ی بازده با پنج نوع مش بندی مختلف

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 شبیه سازی، حالت سوم انتخاب شده است.

۳-۲- اعتبار سنجی

جاذب	Mix Boundary Condition	$\rho = 2500 \text{ Kg}/\text{m}^3$
پوشش بالایی (شیشه)	$h_f = 20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$	$C_p = 800 \text{ J}/\text{Kg}\cdot\text{K}$
	$t_f = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$\lambda = 0.75 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$
		$\varepsilon_g = \alpha_g = 0.9$
باقل	Adiabatic	-
دیواره‌های جانبی	Adiabatic	-



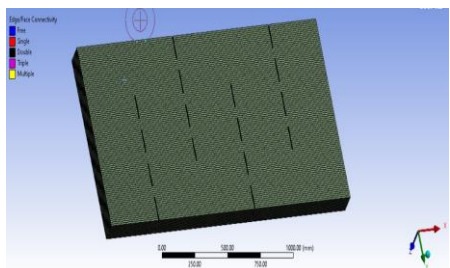
شکل ۳- شرایط مرزی انتخاب شده در این پژوهش

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 حالت‌ها مسئله حل شد و میزان بازدهی (کارایی) هواگرمن با استفاده از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد [۲۵-۲۷].

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

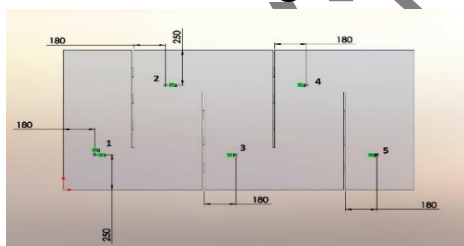
که در این رابطه  $\dot{m}$  نرخ دبی ورودی به هواگرمن (کیلوگرم بر ثانیه)،  $C_p$  ظرفیت گرمایی هوا (ژول بر کیلوگرم کلونین)،  $T_{out}$  دمای خروجی از هواگرمن (کلونین)،  $T_{in}$  دمای هوای ورودی (کلونین)،  $A$  سطح پوشش شیشه‌ای بالایی هواگرمن (مترمربع) و  $G$  میزان تابش خورشیدی به سطح هواگرمن است.

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



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

پس از مش بندی مدل و اعمال مقادیر ورودی برای سرعت های (۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه) و شرایط مرزی مسئله طبق نمونه های پیشین، نهایتاً مسئله حل شد و پارامترهای خروجی استخراج شد. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده ۵ نقطه در موقعیت های نشان داده شده در شکل ۸ مشخص شد و میزان دمای بالک<sup>۱۱</sup> برای این نقاط استخراج گردید.



شکل ۸- موقعیت نقاط اندازه گیری دمای بالک

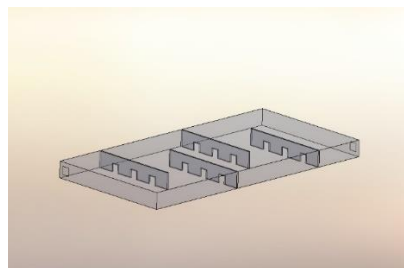
دمای بالک استخراج شده با مقادیر تجربی به دست آمده توسط هو و همکاران مقایسه شد که نتایج این بررسی مقایسه ای، در نمودار ارائه شده در شکل ۹، ارائه شده است. همان طور که از این نمودار می توان مشاهده نمود، این مقادیر اختلاف کمی باهم دارند. نقطه ۱ همان ابتدای تیغه اول هست که دارای دما در حدود ۴۸ کلوین است و جریان با عبور از تیغه ها و رسیدن به انتهای

برای بررسی اعتبار مدل سازی و تأیید نتایج حاصل از این پژوهش، هواگرمکن با ابعاد ذکر شده توسط هو و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. آن ها یک هواگرمکن صفحه تخت با چهار صفحه با ضخامت ۱۰ میلی متر و با فاصله های مساوی و طول ۷۰۰ میلی متر تعریف کردند که هر کدام از این صفحات دارای سه سوراخ مربعی شکل با ابعاد ۶۰ × ۶۰ میلیمتر بوده که با فاصله های مساوی از هم (۱۳۰ میلی متر) قرار گرفته است. این هواگرمکن در شکل ۵ نشان داده شده است.



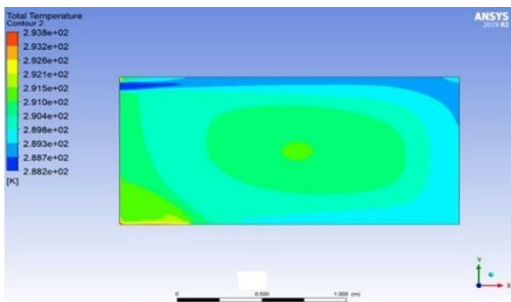
شکل ۵- هواگرمکن صفحه تخت بررسی شده توسط هو و همکاران [۲۷]

همانند مراحل پیشین ابتدا این هواگرمکن مدل سازی شد که مدل طراحی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. برای مش بندی هواگرمکن طراحی شده از مش بندی مکعبی استفاده شد. برای این کار فرآیند استقلال مش همانند نمونه های پیشین انجام شد که مدل مش بندی شده نهایی در شکل ۷ نشان داده شده است.

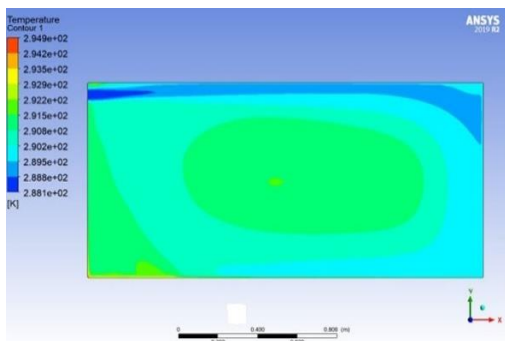


<sup>11</sup> Bulk temperature





(ب)

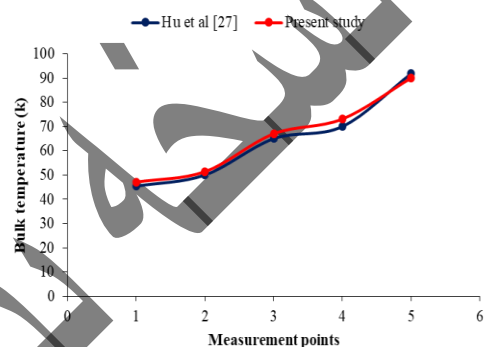


(ج)

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 دیواره‌های 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

هواگرمن (نقطه‌ی شماره ۵) گرم شده و دمای آن بالا می‌رود که میزان اختلاف دمای خروجی هواگرمن در حالت شبیه‌ساز شده با مقادیر آزمایشگاهی استخراج شده توسط هو و همکاران کمتر از ۵ کلون اختلاف دارد که با توجه به حجم 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.

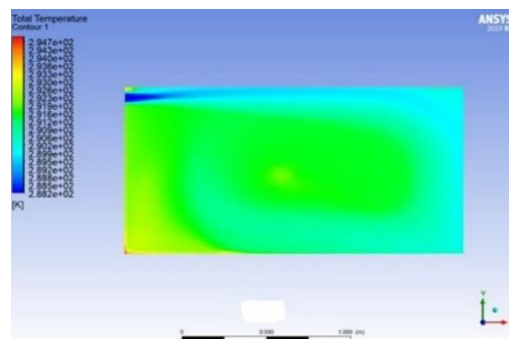


شکل ۹- مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش ارائه شده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- نتایج شبیه سازی بدون بافل

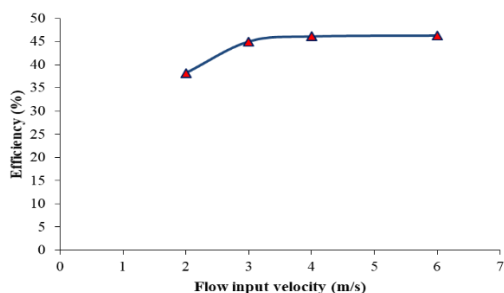
پس از همگرا شدن مسئله تمامی کانتورهای دما، سرعت و جریان برای سه ورودی سرعت ۲،۴،۶ متر بر ثانیه استخراج شدند. شکل ۱۰ مقدار کانتورهای دمای استاتیک برای سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.



(الف)

شکل 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.



شکل ۱۲- تغییرات بازده نسبت به سرعت ورودی

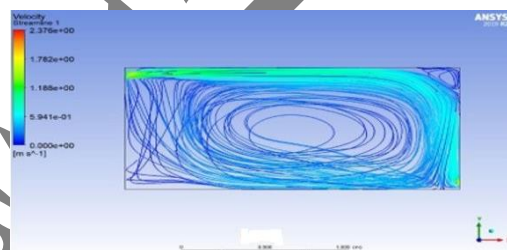
#### ۲-۴- تغییرهندسی جهت افزایش بازده

در این حالت با ایجاد بافل با تعدادهای متعدد میزان تأثیر  
این بافل‌ها بر بازدهی و میزان افت فشار هواگرمن  
بررسی می‌شود.  
در مرحله‌ی اول تعداد ۴ بافل با ضخامت ۱ سانتی‌متر  
برای هندسه‌ی حل در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۳  
هندسه‌ی طراحی شده را نشان می‌دهد. پس از طراحی  
بافل‌ها نهایتاً هندسه‌ی طراحی شده مش بندی شد و  
فرآیند استقلال مش برای آن انجام گرفت و مش بهینه  
انتخاب گردید.

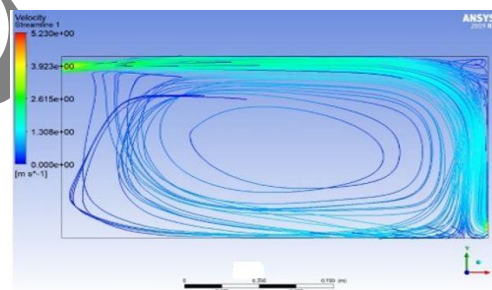


شروع به چرخش می‌کند. هوا در ابتدا سمت پایین و  
قسمت وسط هواگرمن تقریباً ساکن مانده و در نتیجه  
دمای آن باید بیشتر باشد چراکه این مقدار هوا تحت  
تأثیر گرمای بیشتری است. این موضوع در کانتورهای  
دمای استاتیک در شکل ۱۰ نیز آمده است.

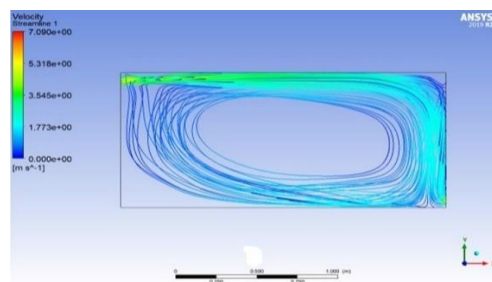
بنابراین با افزایش سرعت جریان ورودی، دمای  
خروجی و در نهایت بازده هواگرمن افزایش می‌یابد.  
به این علت که با افزایش سرعت ورودی، توربولانس  
جریان بیشتر شده و جریان چرخشی خود انرژی جنبشی  
جریان را بالا برده و در نهایت دمای سیال افزایش می‌یابد.



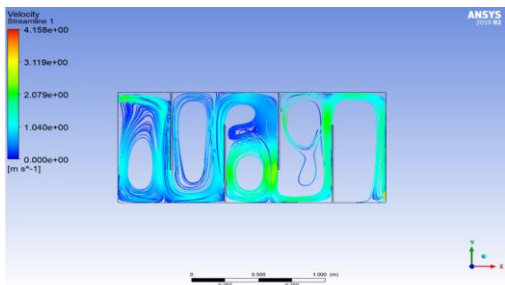
(الف)



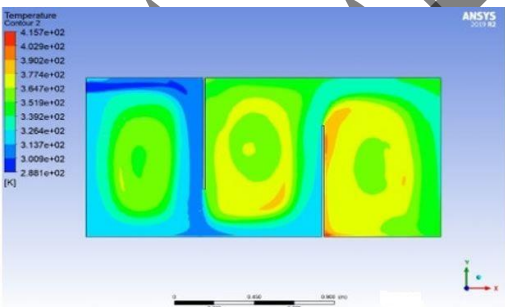
(ب)



(ج)



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 هواگرمکن استخراج شد. شکل ۱۶ کانتورهای دمای استاتیک را برای تعداد بافل- های 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، 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.

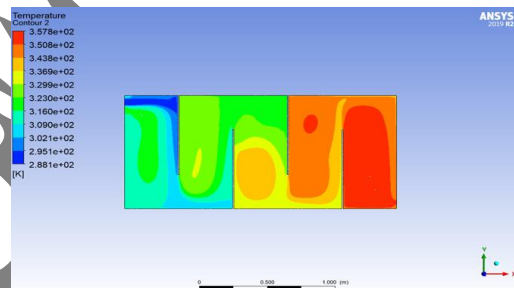


(الف)

شکل ۱۳- طراحی هواگرمکن 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.

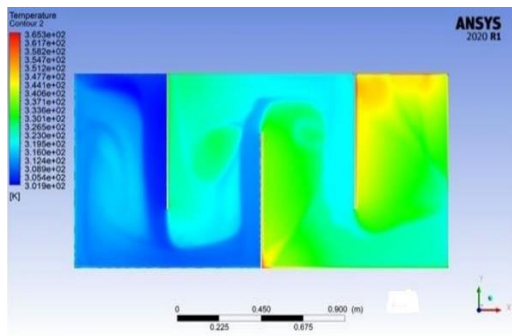
شکل ۱۴ کانتور استخراج شده برای دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت دمای هواگرمکن افزایش داشته است. به طوری که دما نسبت به حالت بدون بافل در حدود ۵۰ درجه افزایش داشته است. دلیل افزایش دما این است که با اضافه کردن تعداد بافل‌ها مقادیر و یک‌های جریان افزایش داشته است؛ و جریان در پشت هرکدام از صفحات دچار چرخش شده و توربولانس ایجاد می‌شود [۲۷-۲۹].



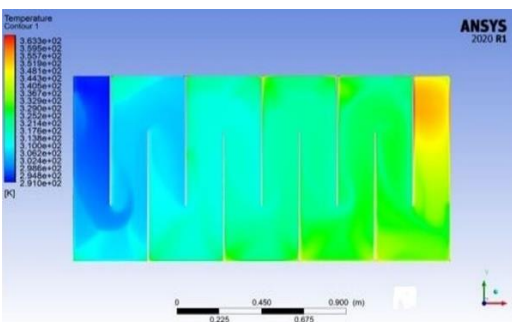
شکل ۱۴- کانتور دما در حالت چهار بافل

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.

حالت ۳ بافل بیشتر است که علت افزایش دما منجر به اتلاف حرارتی بیشتر ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.



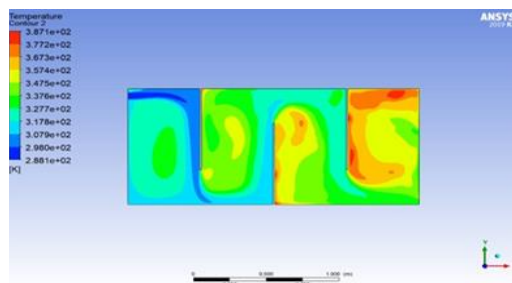
(الف)



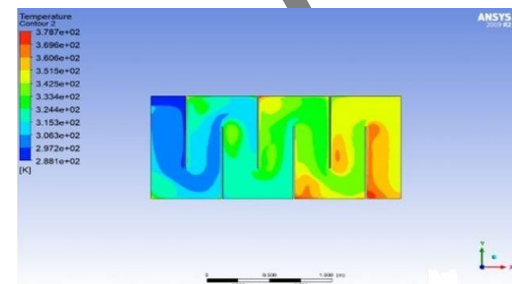
(ب)

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

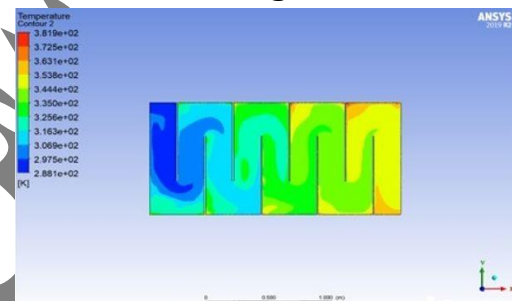
شکل ۱۸ بازده حرارتی در تعداد بافل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشترین بازده مربوط به حالت ۳ بافل است چراکه میانگین دمای سطح شیشه، میانگین دمایی در صفحه میانی و توربولانس جریان در این حالت نسبت به سایر حالت‌ها عملکرد بهتری داشته است. این نمودار نشان می‌دهد که راندمان در حالت ۳ بافل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



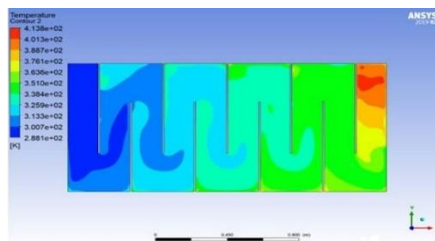
(ب)



(ج)



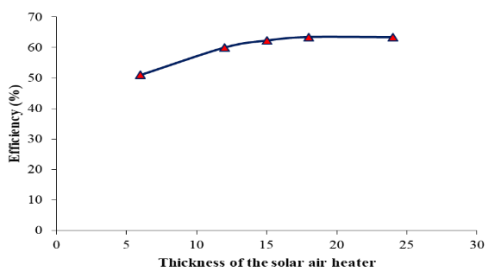
(د)



(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

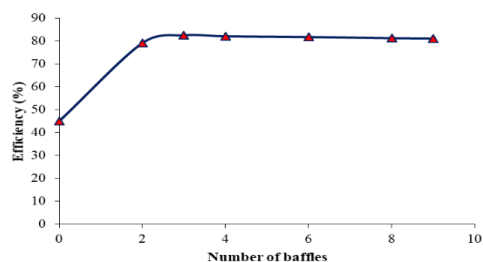
ضخامت کلکتور فضای بیشتری برای انتقال حرارت جابه‌جایی ایجاد می‌شود و فاصله شیشه و صفحه جاذب هم افزایش می‌یابد و میزان اتلاف حرارت تشعشعی به میزان ناچیزی کم می‌شود. با افزایش ضخامت کلکتور و بزرگ‌تر شدن فضا، مشکل ایزوله کردن این فضا و جلوگیری از اتلاف حرارتی پیش می‌آید که در این حالت ضخامت هواگرمن بین ۱۵ تا ۱۸ سانتی‌متر بهترین گزینه می‌باشد.



شکل ۲۰- تغییرات بازده نسبت به ضخامت کلکتور

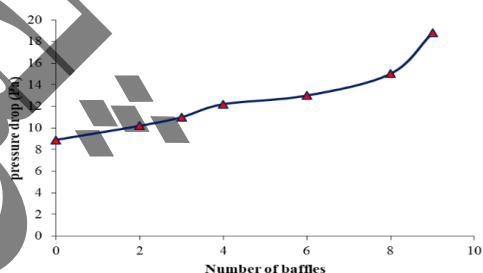
#### ۴-۴- تأثیر تغییر ضخامت شیشه روی بازده

تأثیر ضخامت شیشه و یا به اصطلاح چند جداره کردن شیشه بر روی عملکرد هواگرمن مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار هواگرمن با ۳ بافل با استفاده از شیشه‌ی تک جداره و دو جداره شبیه‌سازی شد. مقادیر کانتورهای استخراج‌شده 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 [۳۱-۳۲]. بنابراین ضریب هدایت حرارتی در حالت دو جداره خیلی کمتر از حالت تک جداره بوده و میزان اتلاف انتقال 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- تغییرات بازده در برابر تعداد بافل

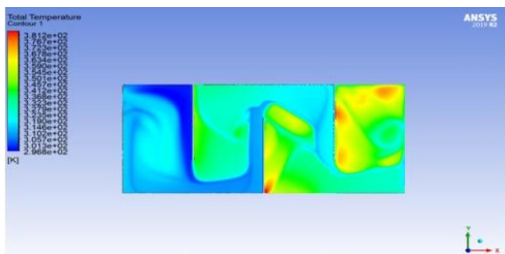
نمودار افت فشار نسبت به تعداد بافل در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تعداد بافل‌ها میزان افت فشار افزایش می‌یابد [۲۷]. به این دلیل که با افزایش تعداد بافل‌ها میزان مقاومت جریان بیشتر شده و در نتیجه اختلاف فشار ورودی با فشار خروجی افزایش یافته که نتیجه‌ی آن افزایش افت فشار در هواگرمن می‌شود.



شکل ۱۹- تغییرات افت فشار نسبت به تعداد بافل‌ها

#### ۴-۳- بررسی تغییر فاصله‌ی هوایی هواگرمن بر بازده

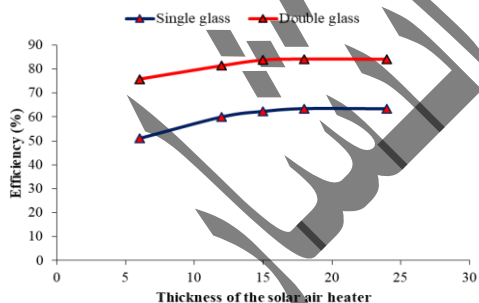
برای بررسی تأثیر فاصله‌ی هوایی از شیشه تا صفحه جاذب مقادیر این فاصله به صورت ۶، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. معادلات حاکم برای هر یک از این حالت‌ها در نظر گرفته شد و میزان بازده حرارتی استخراج شد. شکل ۲۰ تغییرات بازده نسبت به تغییر فاصله هوایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش ضخامت کلکتور ابتدا بازده افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد. با افزایش



(ب)

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

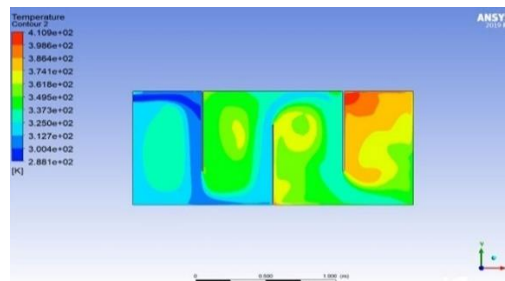
تأثیر فاصله هوایی بین شیشه و صفحه جاذب در حالت تک جداره و دو جداره مورد بررسی قرار گرفت و نمودار تغییرات بازده برای این حالت در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، میزان بازده در حالت دو جداره به مراتب بیشتر از حالت تک جداره است؛ زیرا در حالت دو جداره دمای خروجی به مراتب بیشتر و توربولانس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



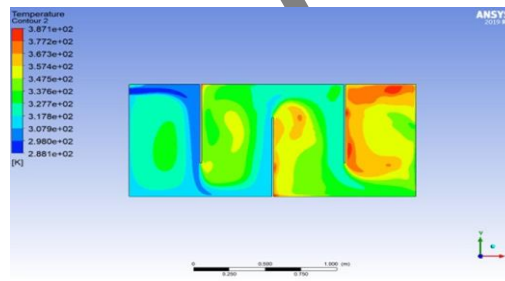
شکل ۲۳- نمودار تغییرات بازده نسبت به فاصله‌ی هوایی برای هواگرمن با شیشه تک جداره و دو جداره

#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش هواگرمن خورشیدی صفحه تخت باهدف بهینه کردن انرژی برداشت شده از هواگرمن با



الف)

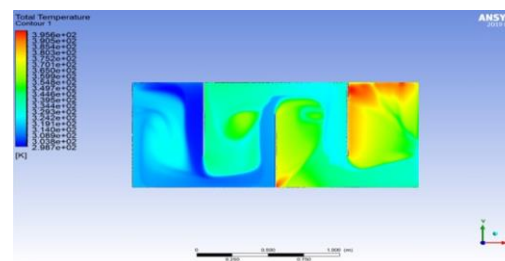


ب)

شکل ۲۱- کانتور دمای استاتیک، الف) شیشه دو

جداره، ب) شیشه تک جداره

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 می باشد. بنابراین بیشتر گرما از طریق تشعشع و جابه جایی به سطح جاذب رسیده و نهایتاً دما افزایش می یابد.



الف)

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 اولیه‌ی مناسب و یافتن مش بهینه بر اساس بررسی پارامترهای مختلف، مسئله در حالت‌ها 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 هواگرماکن افزایش یافت.
- افزایش سرعت جریان ورودی از ۳ متر بر ثانیه به بالا، تغییر قابل توجهی در بازدهی هواگرماکن ایجاد نمی‌کند.
- برای حالت وجود ۴ بافل، میزان بازدهی هواگرماکن نسبت به حالت بدون بافل، حدود ۵۰ درصد افزایش یافت.
- در حالت هواگرماکن 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، یکنواخت‌تر است. بیشترین میزان بازدهی کلی، مربوط به وجود سه بافل در هواگرماکن 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 هواگرماکن 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 هواگرماکن‌های 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 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

A مساحت،  $m^2$

solar dryer by the evacuated heat pipe solar collector," *Journal of Pistachio Science and Technology*, Vol. 3, PP. 73-87, (2019). (In Persian)

[https://pistachio.vru.ac.ir/article\\_102651.html?lang=en](https://pistachio.vru.ac.ir/article_102651.html?lang=en)

[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: 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, Mar, (2010). <https://doi: 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, Nov, (2009). <https://doi: 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, Jan, (2012). <https://doi: 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, May, (2023). <https://doi: 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–

گرمای ویژه در فشار	$C_p$
ثابت، $J/kg \cdot K$	
شدت تابش خورشیدی،	$G$
$W/m^2$	
هدایت حرارتی،	$K$
$W/m \cdot K$	
دبی جریان، $kg/s$	$\dot{m}$
دما، $K$	$T$
زمان، $s$	$t$
علائم یونانی	
چگالی، $kg/m^3$	$\rho$
لزجت، $kg/m \cdot s$	$\mu$
ضریب استفان بولتزمن	$\sigma$
$\frac{w}{m^2 \cdot K^4}$	
واژه نامه	
دمای بالک	Bulk temperature
دینامیک سیالات	CFD
محاسباتی	
الگوریتم کوپل شده	Coupled
مدل مجزا سازی	DO
معادلات	
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

#### ۶- منابع

[1] Barghi Jahromi, Mohammad Saleh, and Massoud Iranmanesh, "Experimental investigation on the use of PCM in a pistachio



Iranmanesh, and Hadi, 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://10.22067/jacsm.2022.75507.1104>

[16] H. Parsa, M. Saffar-Avval, and 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, Jun, (2021).

<https://doi: 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, Nov, (2019).

<https://doi: 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, Feb, (2018).

<https://doi: 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, Jan, (2020).

<https://doi: 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, Mar, (2024).

<https://doi: 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, Nov, (2023).

<https://doi: 10.1016/j.renene.2023.119698>.

[22] M. Iranmanesh, H. S. Akhijahani, and M. S. B. Jahromi, "CFD modeling and evaluation the

1717, May, (2020). (In Persian)  
<https://journals.modares.ac.ir/article-15-38118-en.html>.

[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, Jul, (2024).

<https://doi: 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, Jan, (2009).

<https://doi: 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, Dec, (2006).

<https://doi: 10.1016/j.apenergy.2006.02.005>.

[12] R. Fattoum, A. Hidouri, M. E. H. Attia, M. Anici, 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>.

[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*, Feb, (2024).

<https://doi: 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, Jul, (2020).

<https://doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115744>.

[15], Mohammad Saleh, Barghi Jahromi, Vali, Kalantar, Mohammad, Sefid, Masoud,

- [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, Apr, (2020).  
<https://doi: 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, Nov, (2014).  
<https://doi: 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, Aug, (2021).  
<https://doi: 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, Dec, (2012).  
<https://doi: 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, Jul, (2015).  
<https://doi: 10.1016/j.solener.2015.06.043>.
- performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1192–1213, Jun, (2019).  
<https://doi: 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, Mar, (2023).  
<https://doi: 10.1016/j.est.2023.106961>.
- [24] Barghi Jahromi, Mohammad Saleh, Vali Kalantar, and Mohammad 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://10.48301/kssa.2021.292394.1594>
- [25] Barghi Jahromi, Mohammad Saleh, Masoud Iranmanesh, and Hadi Samimi 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://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: 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, Oct, (2018).  
<https://doi: 10.1016/j.solener.2018.09.075>.