

# افزایش بازده گرمایی هواگرمن‌های خورشیدی با استفاده از شیارهای عرضی و تعیین آرایش بهینه شیارها

رضا ودیعی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

علیرضا رستمزاده خسروشاهی\*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

## چکیده

در این مقاله، عملکرد یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از شیارهای عرضی به صورت عددی بررسی شده است. برای این منظور، معادلات حاکم بر جریان سیال شامل قوانین پیوستگی، مومنتوم و انرژی در نرم‌افزار Fluent حل شده‌اند. با توجه به ملاحظه بودن جریان سیال در داخل هواگرمن‌های خورشیدی و سهم قابل توجه تابش در انتقال گرما، آشفتگی و تابش نیز در نظر گرفته شده‌اند که برای یافتن بهترین مدل‌های آشفتگی و تابش، نتایج حاصل با نتایج مطالعات تجربی قبلی برای هواگرمن بدون شیار مقایسه شده است. سپس با استفاده از بهترین مدل‌های بدست آمده، تأثیرات پارامترهایی نظیر وجود شیار، تغییر شار گرمایی مؤثر، تغییر هندسه و آرایش شیارها در دبی‌های جرمی مختلف، بر بازده گرمایی هواگرمن بررسی و تحلیل شده است. نتایج، افزایش بازده گرمایی با استفاده از شیارهای عرضی را تصدیق کرده و نشان دادند که در بین هندسه‌های مورد بررسی، شیارهای گوه‌ای بهترین بازده گرمایی را دارند. همچنین آرایش بهینه شیارها، برای جریان‌های با اعداد مختلف رینولدز، متفاوت است، بطوریکه در اعداد رینولدز پایین، فاصله بهینه دو شیار مجاور در مقایسه با اعداد رینولدز بالا، بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: هواگرمن خورشیدی، شیارهای عرضی، جریان تناوبی، بازده گرمایی.

## Thermal performance enhancement of solar air heaters by using transverse ribs and determination of optimum arrangement of the ribs

R. Vadiee

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

A. R. Rostamzadeh Khosroshahi

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

## Abstract

In this paper, performance of a solar air heater has been investigated by using of transverse ribs. For this aim, the governing equations for fluid flow including mass, momentum and energy conservation laws have been solved by Fluent software. With respect to having turbulent flow in solar air heaters and noticeable portion of radiation in heat transfer, turbulence and radiation have been considered either and for finding best models for turbulence and radiation, results have been compared with previous experimental studies for solar air heater without ribs. Then effects of parameters such as existence of ribs, changing effective heat flux, geometry and arrangement of the ribs in different mass flow rates, have been studied by using of obtained best models. The results confirmed enhancement of thermal performance by using of transverse ribs and illustrated that wedge shaped ribs have the best thermal performance among the investigated geometries. In addition, optimum arrangement of the ribs is different for various Reynolds numbers. So that in low Reynolds numbers optimum gap between two adjacent ribs is more than it in high Reynolds numbers.

**Keywords:** Solar air heater, Transverse ribs, Periodic flow, Thermal performance

گرمایش آب یا هوا است که در گرمایش هوا، از انرژی خورشیدی برای گرمایش هوای سیستم استفاده می‌شود که این امر با استفاده از گرمکن خورشیدی انجام می‌گیرد. به این ترتیب که با استفاده از یک گرد آورنده خورشیدی<sup>۱</sup>، هوا به داخل گرد آورنده هدایت شده و در خروجی با استفاده از یک فن به داخل ساختمان منتقل می‌شود. هواگرمن‌های خورشیدی به دلیل سادگی ذاتی خود ارزان بوده و به صورت گسترده برای کاربردهای بسیاری در دماهای پایین و متوسط می‌توان از آن‌ها بهره‌برداری کرد. این هواگرمن‌ها معمولاً برای کاربردهایی نظیر خشک کردن محصولات کشاورزی، منسوجات و محصولات دریایی و نیز گرمایش فضاهای ساختمانی در سیستم‌های تهویه مطبوع مورد استفاده

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های نو نظیر انرژی‌های خورشیدی، بادی و آبی به دلیل آلاینده نبودن و عدم محدودیت استفاده از آنها و همچنین محدودیت استفاده از سوخت‌های فسیلی به علت رو به زوال رفتن و آلاینده بودن آن‌ها، اهمیت بسزایی پیدا کرده است. انرژی خورشیدی، یکی از مهمترین و پرکاربردترین انرژی‌های نو بوده و عمدتاً منشأ تمام شکل‌های مختلف انرژی‌های تاکنون شناخته شده موجود در کره زمین می‌باشد و منبعی نامحدود و پاک محسوب می‌شود. از انرژی خورشیدی به دو صورت عمده استفاده می‌شود که عبارتند از استفاده از انرژی گرمایی خورشیدی برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی و همچنین تبدیل پرتوهای خورشید به طور مستقیم یا غیرمستقیم به انرژی الکتریکی. بخش گرمایی، شامل

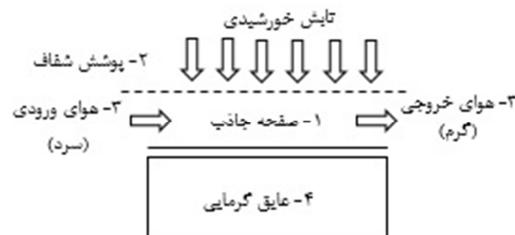
<sup>1</sup> Solar Collector

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: aroostamzadeh@iaut.ac.ir

قرار می‌گیرند.

گرد آورنده‌های خورشیدی معمول، مطابق "شکل ۱" از قسمت‌های اصلی زیر تشکیل می‌شوند.

۱- صفحه جاذب ۲- پوشش یا پوشش‌های شفاف ۳- سیال انتقال دهنده گرما ۴- عایق گرمایی



شکل ۱- اجزای اصلی تشکیل دهنده یک گرد آورنده

جریان هوا در هواگرمن‌های خورشیدی متداول، معمولاً در ناحیه جریان آشفته و بین اعداد رینولدز 3000 تا 15000 می‌باشد [۱]. بازده هواگرمن‌های خورشیدی به دلیل تشکیل زیر لایه ورقه‌ای<sup>۱</sup> در لایه مرزی آشفته کم می‌باشد که برای جبران آن، استفاده از زبری مصنوعی یا شیار بر روی صفحه جاذب، در قسمت گذرنده جریان، به عنوان راه حلی مناسب و بهینه به صورت گسترده پذیرفته شده است [۲]. افزایش انتقال گرما در مبادله کن‌های گرمایی<sup>۲</sup> [۳] و سیستم‌های خنک‌کاری توربین گاز [۴] نیز، با استفاده از زبری مصنوعی گزارش شده است. ساده‌ترین هندسه شیار، شامل عرضی [۵]، مایل [۶]، قوسی شکل [۷] و به شکل حرف V می‌باشند [۸]. شیار مایل به دلیل تولید جریان ثانویه، علاوه بر شکستن زیر لایه ورقه‌ای، ضریب انتقال گرما را بیشتر از شیار عرضی افزایش می‌دهد. فاکتور اصطکاک نیز با کاهش زاویه حمله، به دلیل کاهش نیروی پسا، کم می‌شود. شیار به شکل V، به علت تولید دو ناحیه انتقال گرمایی بالا، باعث افزایش بیشتر ضریب انتقال گرما می‌شود. شیار به شکل V و به سمت پایین، ضریب انتقال گرمایی بالاتر و فاکتور اصطکاک کمتری نسبت به شیار V شکل به سمت بالا، در محدوده اعداد رینولدز معمول در گرد آورنده‌ها را دارد [۶-۷]. شیارهای V شکل چندگانه نیز، عامل بسیار مؤثری جهت افزایش عدد ناسلت گزارش شده‌اند [۱]. فیزیک سیال و جریان گرمایی در هواگرمن خورشیدی، با استفاده از روابط ریاضی نیز بیان شده‌اند. اوانجی برای پیش‌بینی بازده گرمایی گرد آورنده‌های هوایی خورشیدی تک راهی<sup>۳</sup>، مدل و راه حلی تحلیلی را توسعه داد [۹]. بوشان و همکاران، تحلیل بازده گرمایی و ترموهیدرولیکی یک هواگرمن خورشیدی دارای زبری با صفحه جاذب برآمده را به صورت تحلیلی بررسی کردند [۱۰]. مطالعه تحلیلی دیگری توسط اماری، برای پیش‌بینی بازده گرمایی هواگرمن خورشیدی شب‌دار ارائه شد [۱۱]. در مطالعه‌های دیگر، راه حل تحلیلی دقیق برای انتقال گرمایی همرفت در مجراهای مستطیلی شکل، تحت شار گرمایی ثابت، توسط شاه مردان و همکاران ارائه شد [۱۲]. مجیدیان، چهار طرح پیشنهادی هواگرمن خورشیدی را برای سیستم

سرمایش در نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی نموده و مشخصات گرد آورنده بهینه را معرفی نمود [۱۳]. بررسی عملکرد بهینه هواگرمن خورشیدی با چیدمان موانع در کانال به کمک منطق فازی از دیدگاه انرژی و انرژی توسط یاری و صفرزاده انجام شد و آنها نتیجه گرفتند که در بین سه حالت مورد بررسی، هواگرمن با دو پوشش شفاف و با آرایش موانع روی صفحه جاذب دارای بهترین عملکرد می‌باشد [۱۴]. ساخت و مدل‌سازی گرمایی گرد آورنده هوایی مشبک خورشیدی با صفحات جاذب فلزی و غیرفلزی نیز نشان داد که گرد آورنده استیل دارای بهترین کارایی و گرد آورنده پلی‌کربنات دارای پایین‌ترین کارایی می‌باشد [۱۵].

در مطالعه حاضر، در یک هواگرمن خورشیدی، ابتدا به بررسی مدل‌های مختلف آشفستگی و تابش در حالت بدون شیار پرداخته شده و پس از مقایسه نتایج با مطالعات قبلی انجام شده، مدل با کمترین خطا برای هر کدام انتخاب شده است. سپس با استفاده از مدل‌های مذکور، هواگرمن خورشیدی در حالت‌های بدون شیار و دارای شیار با مقاطع مربعی، دوزنقه‌ای، گوه‌ای، دایروی و نیمه بیضوی مدلسازی شده و به بررسی تأثیر استفاده از شیار در این گرد آورنده‌ها و انتخاب بهینه‌ترین هندسه شیار به لحاظ بازده گرمایی پرداخته شده است. همچنین، تأثیر تغییر شار گرمایی در گرد آورنده‌های دارای بهینه‌ترین هندسه شیار، از دیدگاه بازده گرمایی بررسی شده و در نهایت با استفاده از بهترین مدل‌های آشفستگی و تابش و در بهینه‌ترین هندسه شیار، چیدمان شیار-ها تغییر یافته و بهینه‌ترین آرایش، به لحاظ گرمایی انتخاب شده است. نوآوری‌های این مطالعه نسبت به مطالعات قبلی انجام شده شامل بررسی مدل‌های مختلف تابش و استفاده از بهترین مدل تابش، استفاده از شیارهای بیضوی و گوه‌ای (به جای شیار اره‌ای در مطالعه سینگ و همکاران [۱۶])، بررسی تأثیر تغییر شار گرمایی مؤثر و نیز بررسی تأثیر آرایش شیارها در بازده گرمایی هواگرمن دارای شیار گوه‌ای می‌باشد.

## ۲- مبانی و روش‌ها

### ۲-۱- روش‌های آنالیز هواگرمن‌های خورشیدی

فیزیک سیال و جریان گرمایی یک هواگرمن خورشیدی با استفاده از بازده گرمایی، هیدرولیکی و ترموهیدرولیکی آن هواگرمن قابل پیش‌بینی است. بازده گرمایی گرد آورنده، پارامتری اساسی است که باید در نظر گرفته شود. بازده گرمایی شامل ارزیابی ضریب انتقال گرمایی همرفت (h) و تبدیل آن به حالت بی بعد عدد ناسلت (Nu) و راندمان گرمایی ( $\eta_{th}$ ) می‌شود [۱۷]. بازده هیدرولیکی گرمکن خورشیدی به افت فشار ( $\Delta P$ ) وابسته است که این افت فشار با افزایش اصطکاک (f) در داخل هواگرمن، بیشتر می‌شود. بازده ترموهیدرولیکی هواگرمن خورشیدی، وضعیت و موقعیت زبری مصنوعی را به لحاظ بیشترین انتقال گرما و کمترین اصطکاک، مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۱۸].

### ۲-۲- معادلات حاکم

جهت مدلسازی جریان سیال و انتقال گرما در هواگرمن خورشیدی، معادلات اساسی جریان سیال شامل پیوستگی، مومنوم و انرژی به صورت عددی گسسته‌سازی شده‌اند که این معادلات بترتیب به صورت زیر می‌باشند.

<sup>1</sup> Laminar

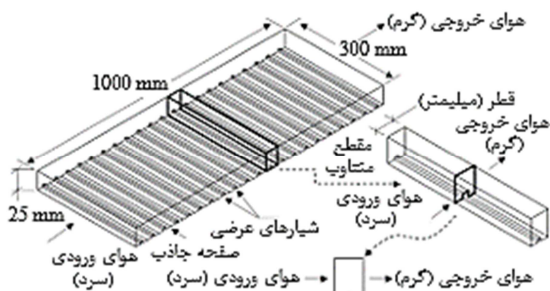
<sup>2</sup> Heat Exchangers

<sup>3</sup> Single Pass Solar Air Collectors

محاسبه شده است (جدول ۳). قطر هیدرولیکی در حالت بدون شیار تقریباً  $4 \cdot 615e - 2$  m و در حالت دارای شیار برابر  $4 \cdot 272e - 2$  m می‌باشد. با توجه به تغییر چگالی هوا با تغییرات دمایی و به علت وجود جابجایی طبیعی، چگالی هوا با استفاده از تقریب Boussinesq محاسبه شده است. برای یافتن جواب‌های دقیق‌تر، از Gradient Adaption برای بهینه‌سازی گرادینان‌های دما، سرعت، تنش برشی دیوار و شدت آشفتگی استفاده شده است. مقادیر Angular Discretization برای Phi Division و Theta Division برابر با 2 و برای Theta Pixels و Phi Pixels برابر 1 در نظر گرفته شده است. الگوریتم حل معادلات کوپل فشار- سرعت، SIMPLE می‌باشد. برای گسسته‌سازی فشار به علت تغییرات چگالی سیال از روش PRESTO! استفاده شده است که دلیل آن جوابهای مناسب این روش در مواردی است که نیروهای شناوری دارای اهمیت می‌باشند. برای گسسته‌سازی جملات جابجایی نیز از Second Order Upwind استفاده شده است. معیار همگرایی مطلق بوده و مقادیر دقت همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنوم  $1e - 05$ ، انرژی  $1e - 08$ ، آشفتگی  $1e - 02$  و تابش  $1e - 06$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد بکار رفته در مدل‌سازی

هوا	
1.225	چگالی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
1006.43	گرمای ویژه ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )
0.0242	رسانایی گرمایی ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )
$1.7894 \times 10^{-5}$	لزجت ( $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ )
0.2	ضریب جذب ( $1/\text{m}$ )
0	ضریب پراکندگی ( $1/\text{m}$ )
1	ضریب شکست
صفحه جاذب	
1	ضریب جذب ( $1/\text{m}$ )
پوشش شفاف	
0.05	ضریب جذب ( $1/\text{m}$ )
0.95	ضریب پراکندگی ( $1/\text{m}$ )
1.526	ضریب شکست



شکل ۲- هواگرمن خورشیدی دارای شیار مربعی و برشی متناوب از آن و نمای دو بعدی مدل شده

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{V})) + S_h \quad (3)$$

دلیل استفاده از مدل‌های انرژی جنبشی-آشفتگی آر-ان-جی<sup>۱</sup> و مختصات گسسته<sup>۲</sup> (DO)، به ترتیب برای مدل‌سازی آشفتگی و تابش در هواگرمن خورشیدی، معادلات مدل‌های آشفتگی و تابش نیز ارائه شده‌اند.

معادله‌های انتقال برای مدل آشفتگی انرژی جنبشی-آشفتگی آر-ان-جی به صورت روابط (۴) و (۵) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5)$$

معادله انتقال تابش مختصات گسسته، برای یک محیط جذب کننده، عبور دهنده و پخش کننده، در موقعیت  $\vec{r}$  در جهت  $\vec{s}$  تعریف می‌شود. مطابق رابطه (۶)، مدل تابش مختصات گسسته، معادله انتقال تابش را برای تعداد محدودی از زاویه‌های جامد گسسته حل می‌کند که هر کدام از این زاویه‌ها با یک بردار در جهت  $\vec{s}$  همراه شده‌اند [۱۹-۲۱].

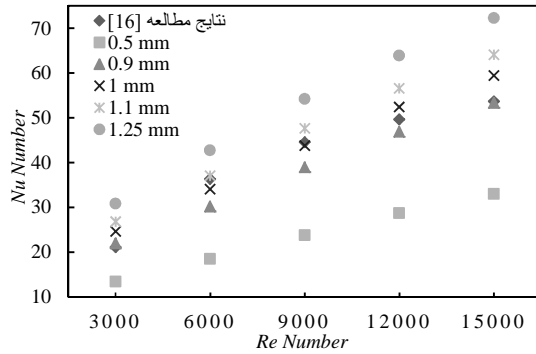
$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_a) I(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{4\pi}{\pi} \sigma_s \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega \quad (6)$$

### ۲-۳- تشریح مدل

سیستم مورد مطالعه، یک هواگرمن خورشیدی به ابعاد  $1000 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  می‌باشد که بر اساس مطالعات قبلی انجام شده، فرض بر این است که بر صفحه جاذب، شار گرمایی ثابت  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  وارد می‌شود. سیال گذرنده از داخل گرد آورنده نیز جریان هوا با مشخصات مذکور در "جدول ۱" می‌باشد که از یک جهت وارد گرمکن شده و در اثر انتقال گرما با صفحه جاذب گرم شده و از جهت مقابل خارج می‌شود که هوا در تابش سهیم در نظر گرفته شده است. خواص فیزیکی صفحه جاذب و پوشش شفاف نیز مطابق "جدول ۱" می‌باشد. به دلیل تقارن هندسه و فیزیک مسأله و تناوبی بودن رفتار سیال در داخل گرد آورنده، فقط قسمتی از هندسه که در "شکل ۲" نشان داده شده، مدل‌سازی و تحلیل شده است. شکل و هندسه انواع شیارهای مورد استفاده برای مطالعه در "شکل ۳" نشان داده شده است و جزئیات شیارها در "جدول ۲" آورده شده است که در اغلب کارهای تجربی مورد استفاده می‌باشند [۱۶]. در قسمت شرایط مرزی، مرزهای بالا و پایین Wall در نظر گرفته شده‌اند که شرایط تابشی دیوارها کدر می‌باشد. مرزهای ورودی و خروجی نیز بصورت تناوبی انتقالی تعریف شده‌اند بطوریکه در قسمت شرایط تناوبی گزینه Specify Mass Flow فعال و دبی جرمی محاسبه شده برای حالت‌های مختلف عدد رینولدز و گرد آورنده با شیارهای مختلف وارد شده است. برای یافتن دبی جرمی، قطر هیدرولیکی و سرعت جریان بترتیب از روابط  $V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D_h}$  و  $D_h = \frac{4A}{p}$

<sup>1</sup> k-ε, RNG, Enhanced wall treatment

<sup>2</sup> Discrete Ordinates



شکل ۴- بررسی استقلال حل از شبکه بندی برای اندازه های مختلف مش در گرد آورنده دارای شیار دوزنقه ای

### ۳-۲- انتخاب بهترین مدل آشفتگی و تابش

همانطور که قبلاً اشاره شد، جریان سیال در هوا گرمکن های خورشیدی متداول، معمولاً در محدوده جریان آشفتنه و بین اعداد رینولدز 3000 تا 15000 می باشد [۱]. به همین دلیل، برای بدست آوردن نتایجی دقیق از شبیه سازی عددی، یافتن بهترین مدل آشفتگی برای تحلیل هواگرمکن های خورشیدی، امری ضروری است. بنابراین از انواع مدل های جریان آشفتنه برای مدلسازی آشفتگی در هواگرمکن خورشیدی ساده (بدون شیار) استفاده شده است که بازده گرمایی آن ها با توجه به عدد ناسلت، با روابط تجربی (Y) و (A) مقایسه شده است [۲۲-۲۳].

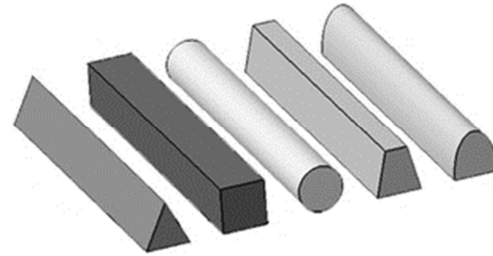
$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \text{ , for } 3000 < Re < 10000 \quad (Y)$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \text{ , for } Re > 10000 \quad (A)$$

که در روابط مذکور، f به صورت رابطه (۹) تعریف می شود.

$$f = (0.079 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (9)$$

"شکل 5" مقایسه اعداد ناسلت حاصل از تحلیل عددی هواگرمکن خورشیدی بدون شیار بر حسب اعداد رینولدز در مدل های آشفتگی مورد مطالعه با روابط تجربی (Y) و (A) را نشان می دهد. با توجه به اختلاف فاحش برخی از مدل ها با داده های روابط تجربی، آن مدل ها از "شکل 5" حذف شده و فقط مدل های با خطای کمتر برای مقایسه در نمودار نشان داده شده اند. با بررسی "شکل 5" مشخص می شود که مدل آشفتگی انرژی جنبشی- آشفتگی آر-ان-جی در مقایسه با مدل های دیگر، بهترین مدل برای تحلیل جریان آشفتنه در هواگرمکن های خورشیدی می باشد. دلیل این امر این است که مدل آشفتگی دو معادله ای k-ε در جریان های داخلی که دارای گرادبان فشار پایینی باشند، دارای دقت مناسبی می باشد [۲۴].



شکل ۳- طرحواره انواع شیارهای عرضی به کار رفته در هواگرمکن خورشیدی

جدول ۲- ابعاد شیارهای مورد استفاده

شکل شیار	ابعاد
شیار مربعی	2 میلیمتر × 2 میلیمتر
شیار دوزنقه ای	2 میلیمتر ارتفاع × 2 میلیمتر قاعده بزرگ × 1 میلیمتر قاعده کوچک
شیار دایروی	قطر 2 میلیمتر
شیار نیمه بیضوی	4 میلیمتر قطر بزرگ × 2 میلیمتر قطر کوچک
شیار گوه ای	2 میلیمتر قاعده × 2 میلیمتر ارتفاع

جدول ۳- مقادیر سرعت و دبی جرمی در اعداد رینولدز مختلف

Re	V		m	
	بدون شیار	دارای شیار	بدون شیار	دارای شیار
3000	0.9495	1.0257	0.008723	0.008669
6000	1.8989	2.0514	0.01745	0.01734
9000	2.8484	3.0771	0.02617	0.02601
12000	3.7979	4.1028	0.03489	0.03468
15000	4.7474	5.1284	0.04362	0.04335

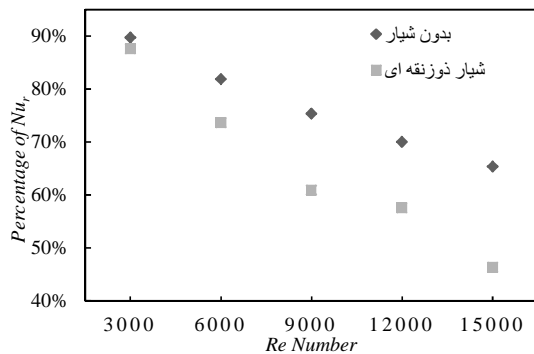
### ۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی رابطه مستقیم با عدد ناسلت دارد، بر همین اساس، در ادامه برای بررسی بازده گرمایی روی عدد ناسلت تمرکز شده است.

#### ۳-۱- بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکه بندی، اعداد ناسلت مربوط به هواگرمکن خورشیدی مورد مطالعه برای حالت دارای شیار دوزنقه ای و برای سایزهای مختلف شبکه بدست آمده و با نتایج حاصل از مطالعه عددی [۱۶] مقایسه شده است که این نتایج در "شکل ۴" ارائه شده است. در این مطالعه، شبکه 1 میلیمتر و y+ حدود 2، دارای دقت مناسبی بوده و به عنوان شبکه مورد استفاده در مدلسازی عددی انتخاب شده است.

همرفت با عدد رینولدز می‌باشد.

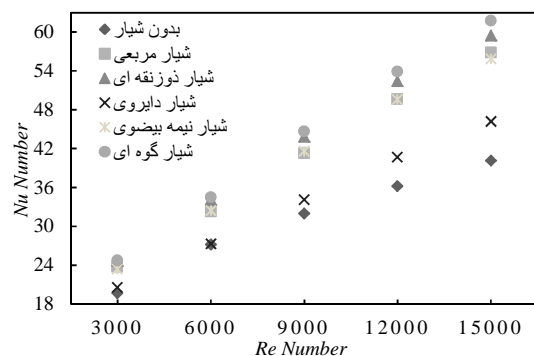


شکل ۷- درصد ناسلت تابشی برای حالت‌های بدون شیار و دارای شیار دوزنقه‌ای در اعداد رینولدز مختلف

### ۳-۳- بررسی بازده گرمایی هواگرمن‌های خورشیدی

#### بدون شیار و دارای شیارهای مختلف

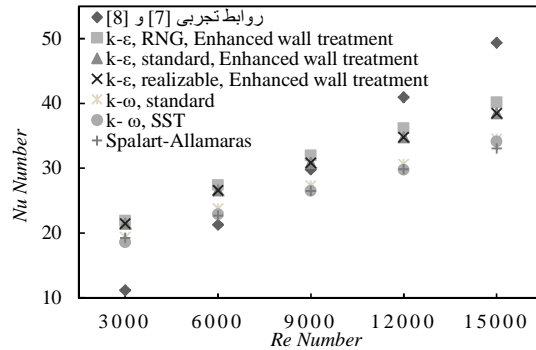
در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل عددی بازده گرمایی هواگرمن خورشیدی مورد مطالعه، در دو حالت بدون شیار و دارای شیارهای با مقاطع مربعی، دوزنقه‌ای، گوه‌ای، دایروی و نیمه بیضوی، در اعداد رینولدز مختلف بر حسب اعداد ناسلت، در "شکل ۸" نشان داده شده است.



شکل ۸- عدد ناسلت متوسط در هواگرمن خورشیدی برای شکل‌های مختلف شیار

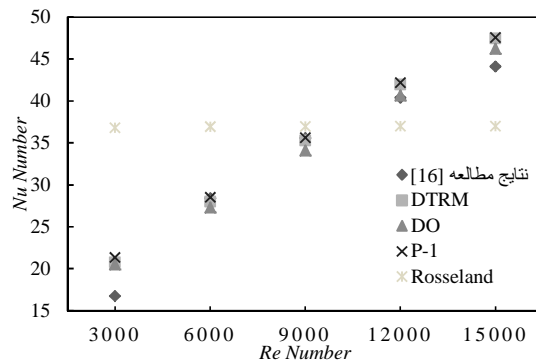
با توجه به نتایج "شکل ۸" مشخص می‌شود که بازده گرمایی هواگرمن‌های خورشیدی دارای شیار در مقایسه با حالت بدون شیار بیشتر می‌باشد. دلیل این افزایش بازده، این است که در صورت عدم وجود شیار، لایه مرزی لزجی توسعه می‌یابد که تأثیر میرایی لزجت مولکولی بر نوسانات سرعت جریان آشفته، باعث کاهش ضریب انتقال گرمایی همرفت و در نتیجه کاهش بازده گرمایی می‌شود [۲۵-۲۷].

این مشکل با استفاده از زبری مصنوعی یا شیار بر روی صفحه جاذب حل می‌شود. بطوریکه، استفاده از شیار اولاً سطح تماس سیال را افزایش می‌دهد و ثانیاً باعث ایجاد آشفتگی در داخل مجرای جریان می‌شود که این آشفتگی توسعه لایه لزج را کاهش داده و ضریب انتقال گرمایی همرفت و در نتیجه بازده گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین "شکل ۸" نشان می‌دهد که بازده گرمایی هواگرمن خورشیدی دارای



شکل ۵- خروجی مدل‌های آشفتگی مورد مطالعه و روابط تجربی (۵) و (۶)

برای انتخاب بهترین مدل تابش برای هواگرمن خورشیدی مورد مطالعه، نتایج بدست آمده از تحلیل گرمایی هواگرمن بدون شیار که از طریق تحلیل عدد ناسلت بر حسب اعداد رینولدز در مدل‌های مختلف تابش شامل  $DO$ ،  $DTRM$ ،  $P-1$ ،  $Roseland$  حاصل شده‌اند، با نتایج مطالعه [۱۶] مقایسه شده‌اند که این نتایج در "شکل ۶" ارائه شده‌اند. با بررسی "شکل ۶" مشخص می‌شود که مدل مختصات گسسته برای تحلیل تابش گرمایی هواگرمن خورشیدی مورد مطالعه بهترین مدل می‌باشد. همچنین علت عدم استفاده از مدل سطح به سطح ( $S2S^2$ )، عدم امکان استفاده از این مدل در مسائل تناوبی است.



شکل ۶- ارزیابی دقت مدل‌های مختلف تابش مورد مطالعه

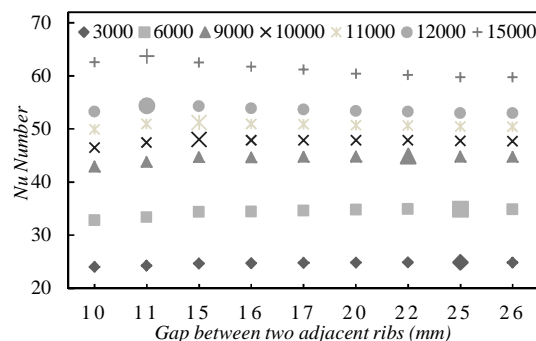
با توجه به اینکه انتقال گرمایی کلی در مسئله شامل دو بخش تابشی و همرفت می‌باشد، سهم هر کدام از آنها با لحاظ نمودن عدد ناسلت همرفتی ( $Nu_h$ ) و ناسلت تابشی ( $Nu_r$ ) ارائه شده است. در "شکل ۷" درصد ناسلت تابشی، به عنوان نمونه برای حالت‌های بدون شیار و دارای شیار دوزنقه‌ای در اعداد رینولدز مختلف آورده شده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود که در عدد رینولدز 3000 درصد ناسلت تابشی در حدود 90 درصد بوده و با افزایش عدد رینولدز جریان در هر دو حالت، درصد ناسلت تابشی کاهش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، سهم انتقال گرمایی تابشی کاهش یافته و برعکس، سهم انتقال گرمایی همرفتی افزایش می‌یابد که دلیل این امر، رابطه مستقیم ضریب

<sup>1</sup> Discrete Transfer Radiation Model

<sup>2</sup> Surface-to-Surface

گرفته شده بود و در این بخش تأثیر تغییر فاصله شیارها بر روی بازده گرمایی بررسی شده است و نتایج حاصل از این تحلیل در "شکل ۱۰" نشان داده شده است. با توجه به این شکل، که مقادیر بیشینه عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف، با سایز بزرگتر متمایز شده‌اند، مشخص می‌شود که در اعداد رینولدز پایین‌تر از 9000، افزایش فاصله بین دو شیار مجاور تا محدوده‌ای معین، و در اعداد رینولدز بالاتر از 9000، کاهش فاصله بین دو شیار مجاور تا محدوده‌ای معین، باعث افزایش انتقال گرما می‌شود. به طوریکه برای اعداد رینولدز 3000 و 6000، افزایش فاصله بین دو شیار مجاور تا 25 میلی‌متر باعث افزایش انتقال گرما شده و بیشینه انتقال گرما برای هر دو حالت در 25 میلی‌متر می‌باشد. برای عدد رینولدز 9000 نیز، بیشینه انتقال گرما در 22 میلی‌متر حاصل می‌شود. با افزایش عدد رینولدز به 10000 و 11000، بیشینه انتقال گرما در فاصله 15 میلی‌متر بدست می‌آید. برای اعداد رینولدز 12000 و 15000 نیز، بیشینه انتقال گرما با کاهش بیشتر فاصله بین دو شیار مجاور و در 11 میلی‌متر حاصل می‌شود.

در اعداد رینولدز پایین، وجود شیارها در فاصله‌های نزدیک به هم، علاوه بر اینکه آشفتگی لازم برای از بین بردن تأثیر لایه مرزی لزج را به دلیل سرعت کمتر به وجود نمی‌آورد، بلکه باعث بوجود آمدن مانع در برابر جریان نیز می‌شود و به همین دلیل، افزایش فاصله شیارها باعث افزایش عدد ناسلت شده است. درحالی‌که در اعداد رینولدز بالا، سرعت جریان بیشتر بوده و کاهش فاصله شیارها به علت افزایش برخورد جریان با آنها، باعث افزایش آشفتگی و در نتیجه کاهش تأثیر لایه مرزی لزج در مجاورت صفحه جاذب بر نوسانات سرعت جریان آشفته می‌شود که این امر باعث افزایش ضریب انتقال گرمای همرفت می‌شود.



شکل ۱۰- تأثیر آرایش شیارهای گوه‌ای در بازده گرمایی هواگرمن خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

#### ۴- بررسی کانتورهای دما، فشار و بردار سرعت

در هواگرمن خورشیدی مورد مطالعه، شار گرمایی  $1000 \text{ W/m}^2$  بر صفحه جاذب (صفحه زیرین) از طرف خورشید وارد می‌شود که این شار گرمایی، باعث افزایش دمای سیال گذرنده از داخل گرد آورنده می‌شود. شار گرمایی در گرد آورنده بدون شیار به طور یکنواخت اعمال می‌شود که باعث افزایش یکنواخت دما به طریق همرفت، در طول گرد آورنده می‌شود و به علت وجود انتقال گرمای تابش، به دیواره بالا نیز منتقل می‌شود (شکل ۱۱).

شیار گوه‌ای بیشترین مقدار می‌باشد و پس از آن، هواگرمن‌های دارای شیارهای دوزنقه‌ای، مربعی، نیمه بیضوی و دایروی به ترتیب دارای بیشترین بازده می‌باشند. در "جدول ۴" درصد بهبود شیارهای مذکور برای رینولدزهای مختلف آورده شده است. قابل توجه است که با افزایش عدد رینولدز، بازده گرمایی بیشتر می‌شود که دلیل این امر، افزایش آشفتگی به دلیل افزایش انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشد که لایه لزج توسعه یافته در مجاورت دیوار ساکن را کاهش می‌دهد.

جدول ۴- درصد بهبود بازده گرمایی شیارهای مختلف نسبت به یکدیگر در اعداد رینولدز مختلف

درصد بهبود بازده گرمایی			
Re	نسبت شیار دایروی به حالت بدون شیار	شیار نیمه بیضوی نسبت به دایروی	شیار مربعی نسبت به نیمه بیضوی
3000	4.4	13.87	0.014
6000	0.31	18.93	-0.58
9000	6.66	22	-0.0086
12000	12.42	21.98	0.026
15000	15.1	20.87	1.79

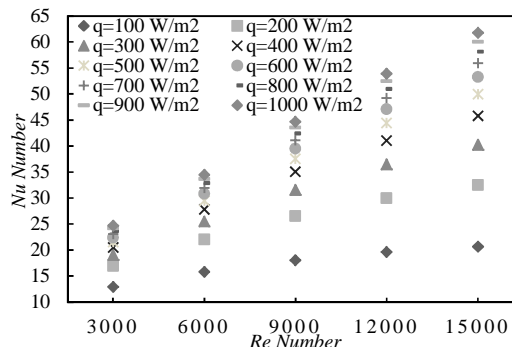
  

Re	شیار دوزنقه‌ای نسبت به مربعی	شیار گوه‌ای نسبت به دوزنقه‌ای
3000	4.05	0.19
6000	5.62	1.25
9000	6.28	1.93
12000	5.62	2.86
15000	4.61	3.89

#### ۴-۳- تأثیر تغییر شار گرمایی مؤثر بر صفحه جاذب در

##### هواگرمن خورشیدی دارای شیار گوه‌ای

با توجه به اینکه شیار گوه‌ای دارای بهترین بازده گرمایی می‌باشد، در این قسمت به بررسی تأثیر تغییر شار گرمایی در بازده  $100 \leq q \leq 1000$ ، در بازده گرد آورنده دارای شیار گوه‌ای پرداخته شده است. با توجه به "شکل ۹" مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار شار گرمایی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد که علت افزایش عدد ناسلت با افزایش مقدار شار گرمایی، با توجه به قانون سرمایش نیوتن قابل توجیه است.

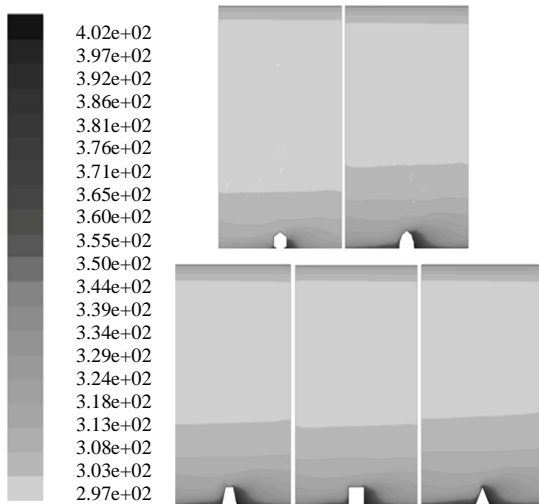


شکل ۹- تأثیر تغییر شار گرمایی بر عدد ناسلت میانگین

#### ۵-۳- بررسی تأثیر آرایش شیارها در بازده گرمایی

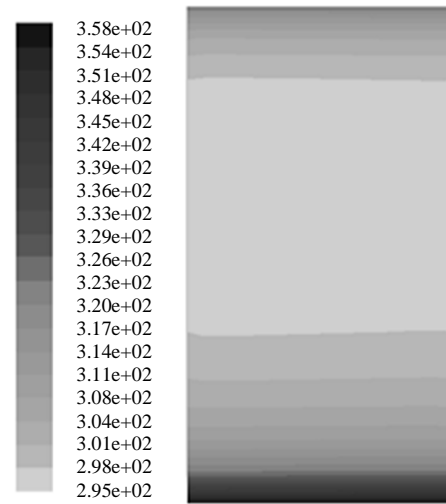
##### هواگرمن خورشیدی دارای شیار گوه‌ای

در بخش‌های قبلی، فاصله بین دو شیار متوالی، 16 میلی‌متر در نظر



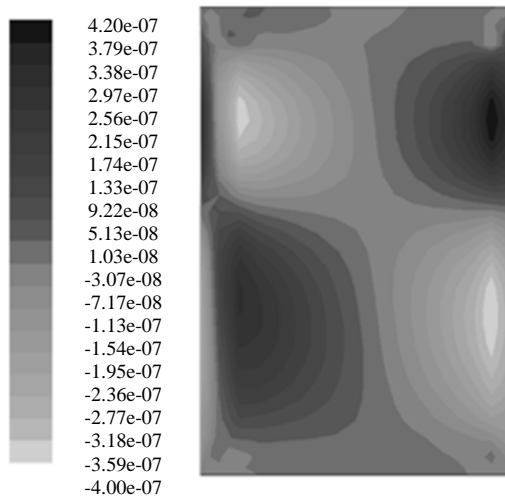
Contours of Static Temperature (k)

شکل ۱۲- کانتور های دما برای هواگرمن خورشیدی در رینولدز 15000 برای شیارهای مختلف



Contours of Static Temperature (k)

شکل ۱۱- کانتور دما برای هواگرمن خورشیدی بدون شیار در رینولدز 15000



Contours of Static Pressure (Pascal)

شکل ۱۳- توزیع فشار برای هواگرمن خورشیدی بدون شیار در رینولدز 15000

در هواگرمن‌های دارای شیار نیز در ابتدای جریان، شار گرمایی تقریباً مشابه گرد آورنده بدون شیار از طریق انتقال گرمای همرفتی باعث افزایش دمای سیال می‌شود "شکل ۱۲"، ولی به هنگام نزدیک شدن به شیار، به دلیل تأثیر لایه مرزی توسعه یافته در اطراف شیار، جریان به سمت بالا سوق می‌یابد. اندکی از جریان نیز به شیارها برخورد کرده و راستای آنها در خلاف جهت جریان عوض می‌شود که بصورت گردابه‌ای کوچک قابل ملاحظه می‌باشد. پس از عبور جریان از شیار نیز، به علت گردابان کاهشی فشار، در قسمتی که شیار تمام می‌شود، قسمتی از جریان برگشته و گردابه‌ای بزرگ تشکیل می‌شود. با توجه به "شکل ۱۲" می‌توان نتیجه گرفت که در قسمت پایین گردابه بزرگ، دمای سیال به دلیل فرصت بیشتر انتقال گرما نسبت به سایر قسمت‌ها به علت چرخش جریان، افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین با توجه به معادله برنولی، در قسمت کم فشار، سرعت افزایش یافته و بر عکس در نقطه سکون، فشار بیشینه و سرعت کمینه (صفر) است (شکل ۱۳ و ۱۴). مطابق "شکل ۱۴" در نقاط سکون، افزایش فشار موضعی اتفاق می‌افتد و در فاصله دورتر از شیار، تغییرات فشار ناچیز می‌باشد.

گرمکن‌های خورشیدی، مدلی مناسب و دارای درصد خطای بسیار کم می‌باشد.

- استفاده از شیر در هواگرمکن‌های خورشیدی، باعث افزایش بازده گرمایی آنها می‌شود.

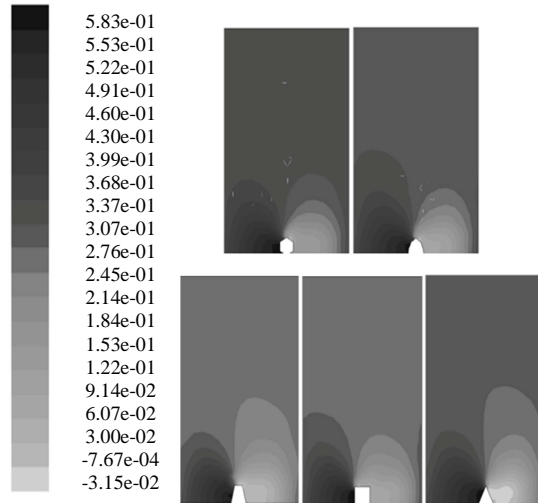
- بازده گرمایی شیرهای با شکل مقاطع مختلف مورد استفاده در هواگرمکن‌های خورشیدی، به ترتیب از بهینه‌ترین، به لحاظ بازده گرمایی، عبارتند از: شیر گوه‌ای، شیر دوزنقه‌ای، شیر مربعی، شیر نیمه بیضوی و شیر دایروی.

- افزایش شار گرمایی مؤثر وارد بر صفحه جذب از 100 تا 1000 وات بر متر مربع، باعث افزایش بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی می‌شود.

- آرایش بهینه شیر به لحاظ گرمایی برای جریان‌های با اعداد رینولدز مختلف، متفاوت می‌باشد. بدین صورت که در اعداد رینولدز پایین، فاصله بهینه دو شیر مجاور در مقایسه با اعداد رینولدز بالا، بیشتر است.

#### ۶- نمادها

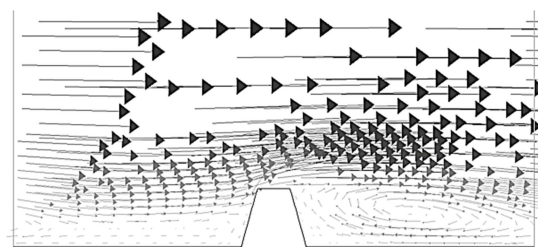
A	مساحت (m)
a	ضریب جذب
$D_h$	قطر هیدرولیکی (m)
E	انرژی کل (J)
$\vec{F}$	نیروی خارجی (N)
f	ضریب اصطکاک سطح (N)
$G_b$	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی به دلیل شناوری سیال (W)
$G_k$	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی به دلیل گرادیان سرعت (W)
$\vec{g}$	شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )
$h_j$	آنتالپی گونه z
I	شدت تابش ( $W/m^2$ )
$\vec{j}$	شار پراکندگی گونه z
K	رسانایی گرمایی (W/m.K)
$k_{eff}$	رسانایی گرمایی مؤثر (W/m.K)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
$Nu_h$	عدد ناسلت همرفتی
$Nu_r$	عدد ناسلت تابشی
n	شاخص انکسار (برگشت)
P	فشار استاتیکی (Pa)
p	محیط (m)
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
$R_\epsilon$	جمله موجود در معادله $\epsilon$
$\vec{r}$	برداری موقعیت (m)
$\vec{s}$	برداری جهت (m)
$\vec{z}$	برداری جهت پخش (m)
$S_{in}$	گرمای واکنش شیمیایی و دیگر منابع گرمایی حجمی (J)



Contours of Static Pressure (Pascal)

شکل ۱۴- توزیع فشار برای هواگرمکن خورشیدی در رینولدز 15000 برای شیرهای مختلف

همچنین با توجه به بردار سرعت در "شکل ۱۵" که برای نمونه در حالت دارای شیر دوزنقه‌ای و برشی از قسمت دارای شیر، برای نمایش گردابه‌ها نشان داده شده است، همانطور که ذکر شد مجموعاً دو گردابه در هواگرمکن خورشیدی دارای شیر تشکیل می‌شود که جهت چرخش هر دوی آنها ساعتگرد می‌باشد. یکی از این گردابه‌ها کوچک و در سمت چپ بوده و به علت برخورد جریان هوا با شیر شکل می‌گیرد و گردابه بزرگ در سمت راست شیرها (پس از عبور جریان از شیر) بوده و به علت گرادیان کاهشی فشار در قسمت بعد از شیر تشکیل می‌شود. قابل ذکر است که در گرد آورنده بدون شیر، گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود.



شکل ۱۵- برشی از بردار سرعت برای هواگرمکن خورشیدی دارای شیر دوزنقه‌ای در اطراف شیر در رینولدز 15000

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، هواگرمکن‌های خورشیدی بدون شیر و دارای شیرهای با شکل مقاطع دایروی، نیمه بیضوی، مربعی، دوزنقه‌ای و گوه‌ای مورد مدل‌سازی و تحلیل عددی قرار گرفتند که مهم‌ترین نتایج این تحلیل عبارتند از:

- مدل آشفته‌گی انرژی جنبشی- آشفته‌گی آر-ان-جی در مقایسه با سایر مدل‌ها، دارای کمترین درصد خطا در مدل‌سازی جریان آشفته در هواگرمکن‌های خورشیدی می‌باشد.

- مدل مختصات گسسته، در مدل‌سازی تابش گرمایی در هوا



on absorber plate, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 45, No. 16, pp. 3383-3396, 2002.

[9] Ong K.S., Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure, *Solar energy*, Vol. 55, No. 2, pp. 93-109, 1995.

[10] Bhushan B., Singh R., Thermal and thermohydraulic performance of roughened solar air heater having protruded absorber plate, *Solar energy*, Vol. 86, No. 11, pp. 3388-3396, 2012.

[11] Ammari H.D., A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats, *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 10, pp. 1597-1615, 2003.

[12] Shahmardan M.M., Norouzi M., Kayhani M.H., Delouei A.A., An exact analytical solution for convective heat transfer in rectangular ducts, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 13, No. 10, pp. 768-781, 2012.

[۱۳] مجیدیان ع.، شبیه سازی عملکرد طرحی نو از کلکتور هواگرم خورشیدی برای سیستم سرمایش خورشیدی یک ساختمان نمونه در مناطق گرم و مرطوب شمال ایران. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۳، ص. ۲۶۱-۲۶۹، ۱۳۹۶.

[۱۴] یاری ش. و صفرزاده ج.، بررسی عملکرد بهینه هواگرمکن های خورشیدی با چیدمان موانع در کانال عبور هوا، به کمک منطق فازی. *مکانیک سازه ها و شاره ها*، د. ۴، ع. ش. ۴، ص. ۳۲۹-۳۴۱، ۱۳۹۵.

[۱۵] افضلی ف.، امیری ح.، نخعی و. و عامری م.، ساخت و مدل سازی حرارتی کلکتورهای هوایی مشبک خورشیدی با صفحات جاذب فلزی (استیل) و غیرفلزی. *مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۷، ش. ۹، ص. ۳۳۹-۳۵۰، ۱۳۹۶.

[16] Singh S., Singh B., Hans V.S., Gill R.S., CFD (computational fluid dynamics) investigation on Nusselt number and friction factor of solar air heater duct roughened with non-uniform cross-section transverse rib, *Energy*, Vol. 84, pp. 509-517, 2015.

[17] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar engineering of thermal processes*, 1980.

[18] Webb R.L., Eckert E.R., Application of rough surfaces to heat exchanger design, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 9, pp. 1647-1658, 1972.

[19] White F.M., Corfield I., *Viscous fluid flow*: McGraw-Hill New York, 2006.

[20] Graebel W., *Advanced fluid mechanics*: Academic Press, 2007.

[21] Chhabra R.P., Richardson J.F., *Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications*: Butterworth-Heinemann, 1999.

[22] Gnielinski V., New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow, *International chemical engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 359-368, 1976.

[23] Dittus F.W., Boelter L.M., Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, *University of California publications in Engineering*, Vol. 2, pp. 371, 1930.

[24] Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J., Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development, NASA Technical Memorandum.110446, 1997.

[25] Bopche S.B., Tandale M.S., Experimental investigations on heat transfer and frictional characteristics of a turbulator roughened solar air heater duct, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 11, pp. 2834-2848, 2009.

[26] Twidell J., Weir T., *Renewable energy resources*: Routledge, 2015.

[27] Sukhatme S.P., Nayak J.P., *Solar Energy, New Delhi: Tata McGraw Hill*, Vol. 3rd edition, 2011.

جملات منبع در معادلات انتقال برای مدل آشفتنگی	$S_k$ & $S_\epsilon$
$k - \epsilon$ , RNG	
دمای سیال (K)	T
زمان (s)	t
مؤلفه سرعت جریان (m/s)	$u_i$
بردار سرعت (m/s)	$\vec{v}$
توزیع انبساط نوسانی در جریان آشفته تراکم پذیر نسبت به نرخ اتلاف کلی (kg/m <sup>3</sup> · s یا J/m <sup>3</sup> · s)	$Y_M$
فاصله بی بعد از دیوار	$y^+$
علامه یونانی	
عدد پرانتل آشفتنگی برای k	$\alpha_k$
عدد پرانتل آشفتنگی برای $\epsilon$	$\alpha_\epsilon$
نرخ اتلاف آشفتنگی (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> یا J/kg · s)	$\epsilon$
راندمان گرمایی	$\eta_{th}$
لزجت (Pa.s)	$\mu$
لزجت مؤثر (Pa.s)	$\mu_{eff}$
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$
ثابت استفان-بولتزمن (W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> )	$\sigma$
ضریب پخش	$\sigma_s$
تانسور تنش (N/m <sup>2</sup> )	$\bar{\tau}$
تانسور تنش مؤثر (N/m <sup>2</sup> )	$\bar{\tau}_{eff}$
تابع فاز	$\Phi$
زاویه سطح	$\Omega$
زیرنویس ها	
شناوری سیال	b
مقدار مؤثر	eff
گرما	th

## ۷- مراجع

[1] Hans V.S., Saini R.P., Saini J.S., Performance of artificially roughened solar air heaters—a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 8, pp. 1854-1869, 2009.

[2] Kakaç S., Shah R.K., Aung W., *Handbook of single-phase convective heat transfer*: Wiley New York et al., 1987.

[3] Webb R.L., Principles of Enhanced Heat Transfer. New York: John Wiley&Sons, Inc, 1994.

[4] Sundén B., Brebbia C.A., Faghri M., *Heat transfer in gas turbines*: WIT press, 2001.

[5] Prasad K., Mullick S.C., Heat transfer characteristics of a solar air heater used for drying purposes, *Applied Energy*, Vol. 13, No. 2, pp. 83-93, 1983.

[6] Prasad B.N., Saini J.S., Optimal thermohydraulic performance of artificially roughened solar air heaters, *Solar energy*, Vol. 47, No. 2, pp. 91-96, 1991.

[7] Saini S.K., Saini R.P., Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with roughened duct having arc-shaped wire as artificial roughness, *Solar Energy*, Vol. 82, No. 12, pp. 1118-1130, 2008.

[8] Momin A.M., Saini J.S., Solanki S.C., Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness