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

رضا ودیعی علیرضا رستمزاده خسروشاهی^{*} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیدہ

در این مقاله، عملکرد یک هواگرمکن 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 متلاطم بودن جریان سیال در داخل هواگرمکنهای 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 هواگرمکن 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 هواگرمکن 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 بهترین بازده گرمایی را 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 بهینه شیارها، برای جریانهای با اعداد مختلف رینولدز، متفاوت است، بطوریکه در اعداد رینولدز پایین، فاصله بهینه دو شیار محاور در مقایسه با اعداد رینولدز بالا، بیشتر است.

واژههای کلیدی: هواگرمکن 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. Vadiei	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 می گیرد. به این ترتیب که با استفاده از یک گرد آورنده خورشیدی^۱، هوا به داخل گرد آورنده هدایت شده و در خروجی

با استفاده از یک فن به داخل ساختمان منتقل می شود. هواگر مکن های

خورشیدی به دلیل سادگی ذاتی خود ارزان بوده و به صورت گسترده

برای کاربردهای بسیاری در دماهای پایین و متوسط می توان از آنها بهرهبرداری کرد. این هواگرمکنها 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

¹ Solar Collector

^{*} نويسنده مكاتبه كننده، أدرس پست الكترونيكي: arostamzadeh@iaut.ac.ir تاريخ دريافت: ۹۶/۰۶/۰۲



شکل ۱- اجزای اصلی تشکیل دهنده یک گرد آورنده

جریان هوا در هواگرمکنهای خورشیدی متداول، معمولاً در ناحیه جريان آشفته و بين اعداد رينولدز 3000 تا 15000 مي باشد [١]. بازده هواگرمکنهای خورشیدی به دلیل تشکیل زیر لایه ورقهای 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 [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 می باشند [۸]. شیار مایل به دلیل تولید جریان ثانویه، علاوه بر شکستن زیر لایه ورقهای، ضریب انتقال گرما را بیشتر از شيار عرضى افزايش مىدهد. فاكتور اصطكاك نيز با كاهش زاويه حمله، به دلیل کاهش نیروی پسا، کم میشود. شیار به شکل۷، به علت تولید دو ناحیه انتقال گرمای بالا، باعث افزایش بیشتر ضریب انتقال گرما می شود. شیار به شکل V و به سمت پایین، ضریب انتقال گرمای بالاتر و فاکتور اصطکاک کمتری نسبت به شیار ۷ 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 [1]. فیزیک سیال و جریان گرمایی در هواگرمکن خورشیدی، با استفاده از روابط ریاضی نیز بیان شدهاند. اوانجی برای پیشبینی بازده گرمایی گرد آورندههای هوایی خورشیدی تک راهی، مدل و راه حلى تحليلي را توسعه داد [٩]. بوشان و همكاران، تحليل بازده گرمایی و ترموهیدرولیکی یک هواگرمکن خورشیدی دارای زبری با صفحه جاذب برآمده را به صورت تحليلي بررسي كردند [١٠]. مطالعه تحلیلی دیگری توسط اماری، برای پیشبینی بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی شیبدار ارائه شد [۱۱]. در مطالعهای دیگر، راه حل تحلیلی دقیق برای انتقال گرمای همرفت در مجراهای مستطیلی شکل، تحت شار گرمایی ثابت، توسط شاه مردان و همکاران ارائه شد [۱۲]. مجیدیان، چهار طرح پیشنهادی هواگرمکن خورشیدی را برای سیستم

سرمایش در نرمافزار MATLAB شبیه سازی نموده و مشخصات گرد آورنده بهینه را معرفی نمود [۱۳]. بررسی عملکرد بهینه هواگرمکن خورشیدی با چیدمان موانع در کانال به کمک منطق فازی از دیدگاه انرژی و اگزرژی توسط یاری و صفرزاده انجام شد و آنها نتیجه گرفتند که در بین سه حالت مورد بررسی، هواگرمکن 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 پلی کربنات دارای پایین ترین کارایی میباشد [۱۵].

در مطالعه حاضر، در یک هواگرمکن خورشیدی، ابتدا به بررسی مدل های مختلف آشفتگی 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، هواگرمکن خورشیدی در حالتهای بدون شیار و دارای شیار با مقاطع مربعی، ذوزنقهای، 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 آشفتگی و تابش و در بهینهترین هندسه شیار، چیدمان شیار-ها تغییر یافته و بهینهترین آرایش، به لحاظ گرمایی انتخاب شده است. نوآورى هاى اين مطالعه نسبت به مطالعات قبلى 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 هواگرمکن دارای شیار گوهای میباشد.

۲- مبانی و روشها

۲-۱- روشهای آنالیز هواگرمکنهای خورشیدی

فیزیک سیال و جریان گرمایی یک هواگرمکن خورشیدی با استفاده از بازده گرمایی، هیدرولیکی و ترمو-هیدرولیکی آن هواگرمکن قابل پیشبینی است. بازده گرمایی گرد آورنده، پارامتری اساسی است که باید در نظر گرفته شود. بازده گرمایی شامل ارزیابی ضریب انتقال گرمای همرفت (h) و تبدیل آن به حالت بی بعد عدد ناسلت (Nu) و راندمان گرمایی (hth) میشود [۲۷]. بازده هیدرولیکی گرمکن خورشیدی به افت فشار (ΔP) وابسته است که این افت فشار با افزایش اصطکاک (f) در داخل هواگرمکن، بیشتر میشود. بازده ترموهیدرولیکی هواگرمکن خورشیدی، وضعیت و موقعیت زبری مصنوعی را به لحاظ بیشترین انتقال گرما و کمترین اصطکاک، مورد ارزیابی قرار میدهد [1۸].

۲-۲- معادلات حاکم

جهت مدلسازی جریان سیال و انتقال گرما در هواگرمکن خورشیدی، معادلات اساسی جریان سیال شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت عددی گسستهسازی شدهاندکه این معادلات بترتیب به صورت زیر می باشند.

¹ Laminar

² Heat Exchangers

³ Single Pass Solar Air Collectors

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \vec{V} \right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{V} \vec{V} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\vec{\tau} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{(Y)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{V} (\rho E + p) \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_{j} h_{j} \vec{J}_{j} + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{\nabla})) + S_{h}$$
 (7)

بدلیل استفاده از مدلهای انرژی جنبشی- آشفتگی آر⊣ن-جی ٗ و مختصات گسسته^۲ (DO)، به ترتیب برای مدلسازی آشفتگی و تابش در هواگرمکن خورشیدی، معادلات مدلهای آشفتگی و تابش نیز ارائه شدهاند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - (f)$$

$$\rho \epsilon - Y_M + S_K$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho\varepsilon u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\alpha_{\varepsilon} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_{k} + C_{3\varepsilon} G_{h}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^{2}}{\epsilon} - R_{\varepsilon} + S_{\varepsilon}$$
(Δ)

معادله انتقال تابش مختصات گسسته، برای یک محیط جذب کننده، عبور دهنده و پخش کننده، در موقعیت تم در جهت تم تعریف می شود. مطابق رابطه (۶)، مدل تابش مختصات گسسته، معادله انتقال تابش را برای تعداد محدودی از زاویههای جامد گسسته حل می کند که هر کدام از این زاویهها با یک بردار در جهت ته همراه شدهاند [۱۹]. [۲۱].

$$\nabla \cdot (\mathbf{I}(\vec{\mathbf{r}},\vec{\mathbf{s}})\vec{\mathbf{s}}) + (\mathbf{a} + \sigma_{\mathbf{s}})\mathbf{I}(\vec{\mathbf{r}},\vec{\mathbf{s}}) = \mathrm{an}^{2} \frac{\sigma T^{4}}{\pi} + \frac{\sigma_{\mathbf{s}}}{4\pi} \int_{0}^{4\pi} \mathbf{I}(\vec{\mathbf{r}},\vec{\mathbf{s}}) \Phi(\vec{\mathbf{s}},\vec{\mathbf{s}}) \mathrm{d}\hat{\boldsymbol{\Omega}}$$
(\$)

۲-۳- تشریح مدل

سیستم مورد مطالعه، یک هواگرمکن خورشیدی به ابعاد 1000 mm × 300 mm × 25mm مىباشد كه بر اساس مطالعات قبلى انجام شده، فرض بر این است که بر صفحه جاذب، شار گرمایی ثابت اوارد می شود. سیال گذرنده از داخل گرد آورنده نیز $1000 \frac{W}{m^2}$ 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 می شود 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، $V = \frac{\text{Re} \cdot \mu}{0 \cdot \text{D}_{h}}$ و $D_{h} = \frac{4A}{n}$ روابط D_h = $\frac{4A}{n}$ و الم

² Discrete Ordinates

محاسبه شده است (جدول ۳). قطر هیدرولیکی در حالت بدون شیار تقريباً m = 2 - 4 · 615e و در حالت دارای شيار برابر m = - 272e 4 · 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 گرادیانهای دما، سرعت، تنش برشی دیوار و شدت آشفتگی استفاده شده است. مقادیر Angular Discretization برای Phi Division و Theta Pixels رابر با 2 و براى Theta Pixels و Pixels برابر 1 در نظر گرفته شده است. الگوریتم حل معادلات کوپل فشار- سرعت، SIMPLE مىباشد. براى گسستەسازى 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. معيار همگرايي مطلق بوده و مقادیر دقت همگرایی برای معادلات پیوستگی و مومنتوم 05 – 16، انرژی 08 – 1e، آشفتگی le – 02 و تابش 66 – 1e در نظر گرفته

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد بکار رفته در مدلسازی

شده است.

هوا				
1.225	چگالی(kg/m ³)			
1006.43	گرمای ویژه (j/kg. K)			
0.0242	رسانایی گرمایی (W/m.K)			
1.7894×10^{-5}	لزجت (kg/m.s)			
0.2	ضریب جذب (1/m)			
0	ضریب پراکندگی (1/m)			
1	ضريب شكست			
صفحه جاذب				
1	ضریب جذب (1/m)			
پوشش شفاف				
0.05	ضریب جذب (1/m)			
0.95	ضریب پراکندگی (1/m)			
1.526	ضريب شكست			





خورشيدى

جدول ۲ - ابعاد شیارهای مورد استفاده

ابعاد	شکل شیار
2 ميليمتر × 2 ميليمتر	شيار مربعي
2 میلیمتر ارتفاع × 2 میلیمتر قاعدہ بزرگ × 1	شيار ذوزنقه ای
میلیمتر قاعدہ کوچک	
قطر 2 میلیمتر	شيار دايروى
4 میلیمتر قطر بزرگ × 2 میلیمتر قطر کوچک	شيار نيمه بيضوي
2 میلیمتر قاعدہ × 2 میلیمتر ارتفاع	شیار گوهای

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

D	v	V	ṁ		
ĸe	بدون شيار	دارای شیار	بدون شيار	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- نتايج 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.

۱–۳– بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکهبندی، اعداد ناسلت مربوط به هواگرمکن خورشیدی مورد مطالعه برای حالت دارای شیار ذوزنقهای 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.





۲-۳- انتخاب بهترین مدل آشفتگی و تابش

همانطور که قبلاً اشاره شد، جریان سیال در هوا گرمکنهای خورشیدی متداول، معمولاً در محدوده جریان آشفته و بین اعداد رینولدز 3000 تا 15000 میباشد [۱]. به همین دلیل، برای بدست آوردن نتایجی دقیق از شبیهسازی عددی، یافتن بهترین مدل آشفتگی برای تحلیل هواگرمکنهای خورشیدی، امری ضروری است. بنابراین از انواع مدلهای جریان آشفته برای مدلسازی آشفتگی در هواگرمکن خورشیدی ساده (بدون شیار) استفاده شده است که بازده گرمایی آنها با توجه به عدد ناسلت، با روابط تجربی (۲) و (۸) مقایسه شده است [۲۳–۲۲].

N11 -	$-\frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{for 3000 < Re < 10000}$	(V)
nu -	$1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)$	(')
Nu =	$= 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}$. for $\text{Re} > 10000$	(λ)

که در روابط مذکور، f به صورت رابطه (۹) تعریف می
شود.
 $f = (0.079 Ln \ Re - 1.64)^{-2} \tag{9}$

"شکل 5" مقایسه اعداد ناسلت حاصل از تحلیل عددی هواگرمکن خورشیدی بدون شیار بر حسب اعداد رینولدز در مدلهای آشفتگی مورد مطالعه با روابط تجربی (۷) و (۸) را نشان میدهد. با توجه به اختلاف فاحش برخی از مدلها با دادههای روابط تجربی، آن مدلها از "شکل ۵" حذف شده و فقط مدلهای با خطای کمتر برای مقایسه در نمودار نشان داده شدهاند. با بررسی "شکل ۵" مشخص میشود که مدل آشفتگی انرژی جنبشی- آشفتگی آر-ان-جی در مقایسه با مدلهای دیگر، بهترین مدل برای تحلیل جریان آشفته در هواگرمکنهای خورشیدی می باشد. دلیل این امر این است که مدل آشفتگی دو معادلهای ٤-۲ در جریانهای داخلی که دارای گرادیان فشار پایینی باشند، دارای دقت مناسبی می باشد [۲].



برای انتخاب بهترین مدل تابش برای هواگرمکن خورشیدی مورد مطالعه، نتایج بدست آمده از تحلیل گرمایی هواگرمکن بدون شیار که از طریق تحلیل عدد ناسلت بر حسب اعداد رینولدز در مدلهای مختلف تابش شامل ^۱ Rosseland ،P-1 ،DO ،DTRM حاصل شدهاند، با نتایج مطالعه [17] مقایسه شدهاند که این نتایج در "شکل ۶" ارائه شدهاند. با بررسی "شکل ۶" مشخص میشود که مدل مختصات گسسته برای تحلیل تابش گرمایی هواگرمکن خورشیدی مورد مطالعه بهترین مدل می،اشد. همچنین علت عدم استفاده از مدل سطح به سطح (۲۵۵)،



با توجه به اینکه انتقال گرمای کلی در مسئله شامل دو بخش تابشی و همرفت میباشد، سهم هر کدام از آنها با لحاظ نمودن عدد ناسلت همرفتی (Nu_n) و ناسلت تابشی (Nu_r) ارائه شده است. در "شکل Y" درصد ناسلت تابشی، به عنوان نمونه برای حالتهای بدون شیار و دارای شیار ذوزنقهای 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 گرمای تابشی کاهش یافته و برعکس، سهم انتقال گرمای همرفتی افزایش مییابد که دلیل این امر، رابطه مستقیم ضریب



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

۳-۳- بررسی بازده گرمایی هواگرمکنهای خورشیدی بدون شیار و دارای شیارهای مختلف

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



مختلف شيار

با توجه به نتایج "شکل ۸" مشخص می شود که بازده گرمایی هواگرمکنهای خورشیدی دارای شیار در مقایسه با حالت بدون شیار بیشتر می باشد. دلیل این افرایش بازده، این است که در صورت عدم وجود شیار، لایه مرزی لزجی توسعه می یابد که تأثیر میرایی لزجت مولکولی بر نوسانات سرعت جریان آشفته، باعث کاهش ضریب انتقال گرمای همرفت و در نتیجه کاهش بازده گرمایی می شود [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 گرمای همرفت و در نتیجه بازده گرمایی افزایش مییابد. همچنین "شکل ۸" نشان میدهد که بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی دارای

¹ Discrete Transfer Radiation Model

² Surface-to-Surface

شیار گوهای بیشترین مقدار میباشد و پس از آن، هواگرمکنهای دارای شیارهای ذوزنقهای، مربعی، نیمه بیضوی و دایروی به ترتیب دارای بیشترین بازده میباشند. در "جدول ۴" درصد بهبود شیار های 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						
شيار مربعي	شيار نيمه بيضوى	نسبت شيار دايروى				
نسبت به نیمه	نسبت به دایروی	به حالت بدون شيار نسبت به د				
بيضوى						
0.014	13.87	4.4	3000			
-0.58	18.93	0.31	6000			
-0.0086	22	6.66	9000			
0.026	21.98	12.42	12000			
1.79	20.87	15.1	15000			
	شیار گوهای نسبت	شيار ذوزنقهاي	Re			
	نسبت به مربعی به ذوزنقهای					
	0.19	4.05	3000			
	1.25	5.62	6000			
	1.93	6.28	9000			
	2.86	5.62	12000			
	3.89	4.61	15000			

۴–۳– تأثیر تغییر شار گرمایی مؤثر بر صفحه جاذب در هواگرمکن خورشیدی دارای شیار گوهای

با توجه به اینکه شیار گوهای دارای بهترین بازده گرمایی می باشد، در این قسمت به بررسی تأثیر تغییر شار گرمایی در بازه 2000 ع ≥ 100، در بازده گرد آورنده دارای شیار گوهای پرداخته شده است. با توجه به "شکل ۹" مشاهده می شود که با افزایش مقدار شار گرمایی، عدد ناسلت افزایش می یابد که علت افزایش عدد ناسلت با افزایش مقدار شار گرمایی، با توجه به قانون سرمایش نیوتن قابل توجیه است.



۵-۳- بررسی تأثیر آرایش شیارها در بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی دارای شیار گوهای در بخشهای قبلی، فاصله بین دو شیار متوالی، 16 میلیمتر در نظر

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 پایین تر از 0000، افزایش فاصله بین دو شیار مجاور تا محدودهای معین، و در اعداد رینولدز بالاتر از 1000، کاهش فاصله بین دو شیار مجاور تا محدودهای معین، باعث افزایش انتقال گرما میشود. به طوریکه برای اعداد رینولدز 2000 و 1000 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 2000 نیز، بیشینه انتقال گرما در 2011 میلیمتر حاصل میشود. با افزایش عدد رینولدز به 2000 و 2010، میباشد. برای عدد رینولدز مالا کرما برای هر دو حالت در 25 میلیمتر میباشد. برای عدد رینولدز مالای مراد در ایتوال کرما در 2011 مین در 2000 و 2001 میز، بیشینه انتقال گرما در 2000 و 2000، میلیمتر حاصل میشود. با افزایش عدد رینولدز به 2000 و 2000، میرینولدز 2000 و 2000 نیز، بیشینه انتقال گرما با کاهش بیشتر فاصله رینولدز 2000 و 2000 نیز، بیشینه انتقال گرما با کاهش بیشتر فاصله درینولدز 2000 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.

70	• 300	0 60	00 🔺 9	000 ×	10000	×1100	00 • 12	2000 +	15000
60	+	+	+	+	+	+	+	+	+
solution sector	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ح 30	-								
20	٠	•	•	•	•	•	•	•	•
20	10	11 G	15 ap bet	16 ween tw	17 vo adj	20 acent r	22 ribs (m	25 m)	26
شکل ۱۰– تأثیر آرایش شیارهای گوهای در بازده گرمایی هواگرمکن خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف									
						-			

۴- بررسی کانتورهای دما، فشار و بردار سرعت

در هواگرمکن خورشیدی مورد مطالعه، شار گرمایی 2 W/m 1000 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).





15000 برای شیارهای مختلف



Contours of Static Pressure (Pascal) شکل ۱۳- توزیع فشار برای هواگرمکن خورشیدی بدون شیار در رینولدز 15000





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

در هواگرمکنهای دارای شیار نیز در ابتدای جریان، شار گرمایی تقریباً مشابه گرد آورنده بدون شیار از طریق انتقال گرمای همرفتی باعث افزایش دمای سیال می شود "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 می شود که بصورت گردابه ای کوچک قابل ملاحظه میباشد. پس از عبور جریان از شیار نیز، به علت گرادیان کاهشی فشار، در قسمتی که شیار تمام می-شود، قسمتی از جریان برگشته و گردابهای بزرگ تشکیل می شود. با توجه به "شکل ۱۲" می توان 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 می یابد. 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 می افتد و در فاصله دورتر از شیار، تغییرات فشار ناچیز می باشد.



Contours of Static Pressure (Pascal) شکل ۱۴- توزیع فشار برای هواگرمکن خورشیدی در رینولدز 15000 برای شیارهای مختلف

همچنین با توجه به بردار سرعت در "شکل ۱۵" که برای نمونه در حالت دارای شیار ذوزنقهای و برشی از قسمت دارای شیار، برای نمایش گردابهها نشان داده شده است، همانطور که ذکر شد مجموعاً دو گردابه در هواگرمکن خورشیدی دارای شیار 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 شیار شکل میگیرد و گردابه بزرگ در سمت راست شیارها (پس از عبور جریان از شیار) بوده و به علت گرادیان کاهشی فشار در قسمت بعد از شیار تشکیل میشود. قابل ذکر است که در گرد آورنده بدون شیار، گردابهای تشکیل نمیشود.



شکل ۱۵– برشی از بردار سرعت برای هواگرمکن خورشیدی دارای شیار ذوزنقهای در اطراف شیار در رینولدز 15000

۵- نتیجهگیری

در این مطالعه، هواگرمکنهای خورشیدی بدون شیار و دارای شیارهای با شکل مقاطع دایروی، نیمه بیضوی، مربعی، ذوزنقهای و گوهای مورد مدلسازی و تحلیل عددی قرار گرفتند که مهم ترین نتایج این تحلیل عبارتند از:

- مدل آشفتگی انرژی جنبشی- آشفتگی 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

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

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

 بازده گرمایی شیارهای با شکل مقاطع مختلف مورد استفاده در هواگرمکنهای خورشیدی، به ترتیب از بهینهترین، به لحاظ بازده گرمایی، عبارتند از: شیار گوهای، شیار ذوزنقهای، شیار مربعی، شیار نیمه بیضوی و شیار دایروی.

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

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

۶- نمادها

- (m) مساحت (A
- a ضریب جذب
- (m) قطر هیدرولیکی (m)
 - E انرژی کل (J)
 - آ نيروي خارجي (N)
- f ضریب اصطکاک سطح (N)
- تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل شناوری سیال G_b
 - (W)
- تولید انرژی جنبشی آشفتگی به دلیل گرادیان سرعت
 - (W) G_k
 - (m/s^2) شتاب گرانشی \vec{g}
 - h_j آنتالپی گونه j
 - I شدت تابش (W/m²)
 - j شار پراکندگی گونه j
 - (W/m.K) رسانایی گرمایی (K
 - (W/m.K) رسانایی گرمایی مؤثر (W/m.K)
 - 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 محيط (m)
 - Pr عدد پرانتل
 - Re عدد رينولدز
 - ϵ جمله موجود در معادله R $_{\epsilon}$
 - r بردار موقعیت (m)
 - s بردار جهت (m)
 - َs بردار جهت پخش (m)
- S_h گرمای واکنش شیمیایی و دیگر منابع گرمایی حجمی (J)

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 دانشـگاه تبریـز*، د. ۴۷، ش. ۳، ص. ۲۶۱-۲۶۹، ۱۳۹۶.

[۱۴] یاری ش. و صفرزاده ح.، بررسی عملکرد بهینه هواگرمکن های خورشیدی با چیدمان موانع در کانال عبور هوا، به کمک منطق فازی. مکانیک سازه ها و شاره ها، د. ۶ ش. ۴، ص. ۳۲۹–۳۲۴، ۱۳۹۵.

[۱۵] افضلی ف، امیری ح، نخعی و. و عامری م.، ساخت و مدلسازی حرارتی

[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 nonuniform cross-section transverse rib, *Energy*, Vol. 84, pp. 509-517, 2015.

- [17] Duffle 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 آشفتگی S_K & S_ $_{\epsilon}$

- k ε, RNG(K) (K) (K) (K)
 - ۲ دمای سیال (K)
 - t زمان (8)
- u_i مؤلفه سرعت جریان (m/s)
 - ل بردار سرعت (m/s) ₹
- توزیع انبساط نوسانی در جریان آشفته تراکم پذیر نسبت ۲۸ سمب اتلان کار در قسیل از مین جان
 - ^{IM} به نرخ اتلاف کلی (J/m³ · s) یا I/m³
 - پ⁺ فاصله بیبعد از دیوار

علايم يوناني

- k عدد پرانتل آشفتگی برای $lpha_k$
- عدد پرانتل آشفتگی برای $lpha_{arepsilon}$
- ε نرخ اتلاف آشفتگی (J/kg·s یا J/kg·s)
 - راندمان گرمایی η_{th}

μ لزجت (Pa.s)

µ_{eff} لزجت مؤثر (Pa.s)

ρ چگالی (kg/m³)

- σ ثابت استفان-بولتزمن (W/m²k⁴)
 - _σ ضريب پخش

(N/m²) تانسور تنش (

 (N/m^2) تانسور تنش مؤثر $\overline{\overline{\tau}}_{\rm eff}$

Φ تابع فاز

Ω زاویه سطح

زيرنويسها

شناوري سيال	b
مقدار مؤثر	eff
گر ما	th

۷- مراجع

- 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