مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1395، دوره 16، شماره 13، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص 42-46

مجموعه مقالات دومین کنفرانس بین‌المللی تهویه‌مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
بیرجند، دانشگاه بیرجند، 6 و 7 مهر 1395

مهندسی مکانیک مدرس
mme.modares.ac.ir

بررسی عددی مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی کلکتورهای خورشیدی کنگره‌دار هواگرم

حسین خراسانی‌زاده[1*]، سروش صدری‌پور[2]، علیرضا آقایی[3]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
* کاشان، صندوق پستی 8731753153، khorasan@kashanu.ac.ir

چکیده

در این مطالعه به‌صورت عددی اثر کنگره‌دار شدن صفحه جاذب بر مشخصه‌های انتقال حرارت و جریان آشفته در کلکتورهای خورشیدی هواگرم بررسی شده است. معادلات حاکم با روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. بدین منظور صفحه جاذب کنگره‌دار در سه مدل مثلثی، مستطیلی و سینوسی در محدوده رژیم جریان آشفته بین اعداد رینولدز 2500 تا 4000 مطالعه شده است. انتخاب هندسه مناسب براساس بهترین معیار ارزیابی عملکرد (PEC) و افزایش دمای هوا از ورودی تا خروجی کلکتور (ITIO) انجام شده است. تمامی شبیه‌سازی‌ها برای دو زاویه شیب متفاوت کلکتور با راستای افق، که زوایای بهینه برای تنظیم شش ماهه کلکتورهای تخت در شهر کاشان هستند، انجام شد. نتایج نشان داد استفاده از صفحه جاذب کنگره‌دار به‌طرز قابل ملاحظه‌ای بر میدان جریان و انتقال‌حرارت تأثیر گذار است. برای تمامی طول سال، بالاترین PEC برای مدل کنگره‌دار سینوسی به‌دست آمد؛ اما بالاترین ITIO برای مدل کنگره‌دار مستطیلی حاصل شد. همچنین مشخص شد که برای بیشترین ITIO و بالاترین PEC، رینولدز بهینه برابر 2500 است.

کلید واژگان: کلکتور خورشیدی، صفحه جاذب کنگره‌دار، جریان آشفته، معیار ارزیابی عملکرد

Numerical investigation of thermo-hydraulic characteristics of corrugated air-heater solar collectors

Hosein Khorasanizadeh*, Soroush Sadripour, Alireza Aghaei

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
* P.O.B. 8731753153 Kashan, Iran, khorasan@kashanu.ac.ir

ABSTRACT

In this study, the effects of using corrugated absorber plate on heat transfer and turbulent flow in solar air-heater collectors were numerically investigated. The two-dimensional governing equations were solved by utilizing finite volume method and SIMPLE algorithm. The absorber plate with triangle, rectangle and sinuous corrugations in turbulent flow regime and Reynolds number was considered within the range of 2500-4000. Proper geometry was selected based on the best performance evaluation criteria (PEC) and increasing the air temperature from collector inlet to outlet (ITIO). Simulations were performed for two different tilt angles of collector, which are the optimum six month tilts for flat plate solar collectors in Kashan. The results revealed that using corrugated absorber plate has a considerable influence on the flow field and heat transfer. For the whole year the highest PEC was obtained for the sinusoidal corrugated model, however, the highest ITIO was observed for rectangular corrugated model. To achieve best ITIO and the highest PEC, the optimum Reynolds number of 2500 was also noticed.

Keywords: Solar collector, Corrugated absorber plate, Turbulent regime, Performance evaluation criteria

1- مقدمه

با توجه به ذخایر محدود انرژی فسیلی و ضررهای استفاده از آن‌ها برای محیط زیست، کاوش به‌منظور یافتن انرژی‌های تجدیدپذیر لازم به نظر می‌رسد [1]. با توجه به نیاز به هوای گرم در صنعت، کشاورزی، دام‌پروری و امور خانگی، استفاده از کلکتورهای خورشیدی هواگرم می‌تواند مفید و مؤثر باشد. به‌منظور افزایش بازدهی کلکتورهای خورشیدی راه حل‌های گوناگونی وجود دارد. یک راه استفاده از روش‌هایی برای جذب بیش‌تر تشعشع خورشیدی است که معمولاً از طریق تنظیم زاویه شیب کلکتور و قرار دادن آن در زاویه شیب بهینه انجام می‌شود. خراسانی‌زاده و مسچی [2] زاویه‌های شیب °9 و °51 را به‌ترتیب برای تنظیم کلکتورهای تخت در شش ماه اول و دوم سال در شهر کاشان پیشنهاد نمودند. راه حل دوم ایجاد تغییراتی در هندسه کلکتور خورشیدی برای دست‌یابی به بالاترین بازدهی حرارتی است. ایجاد کنگره روی سطح داخلی مبدل‌های حرارتی، یک روش مناسب برای شکستن زیر لایه آرام جریان و ایجاد آشفتگی‌های دیواره‌ای محلی است، که مقاومت حرارتی را کاهش و انتقال‌حرارت را به‌طرز قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. روش و همکاران [3] رفتار جریان و انتقال حرارت محلی در معابر موج‌دار سینوسی را برای نواحی رژیم جریان آرام و نیز ناحیه گذار بررسی نمودند. وانگ و وانکا [4] انتقال حرارت جابه‌جایی را در یک معبر موج‌دار متناوب به‌صورت عددی مطالعه نمودند. نافون [5] به‌منظور بررسی اثرات هندسه صفحه موج‌دار بر انتقال‌حرارت و توزیع جریان، یک مطالعه عددی بر روی جریان هوای آشفته انجام داد. در این مطالعه به‌روش عددی مقایسه دقیقی برای بررسی مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی جریان آشفته هوا در کلکتورهای دارای صفحات جاذب کنگره‌دار سینوسی، مستطیلی و مثلثی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H.Khorasanizadeh, S.Sadripour, A.Aghaei, Numerical investigation of thermo-hydraulic characteristics of corrugated air-heater solar collectors, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 42-46, 2016 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.46.3]

انجام شده است. بدین منظور معیار ارزیابی عملکرد[1] و بیشترین افزایش دمای هوا از ورودی تا خروجی کلکتور[2]، موردنظر قرار گرفته اند.

2- الگوسازی عددی

2-1- مدل فیزیکی

نمای شماتیک کلکتور دو بعدی با ارتفاع ورودی 2H=20 mm در "شکل 1" نشان داده شده است. هندسه مسأله شامل دیواره‌های کنگره‌دار دو بعدی با 18 موج در طول بخش مورد آزمایش است. طول موج دیواره‌ها در هر سه مدل برابر λ=1 cm و دامنه موجها α=3 mm است. طول کلکتور برابر L=2m است. برای بخش سمت چپ کانال شرط مرزی سرعت ورودی در محدوده اعداد رینولدز آشفته بین 2500 تا 4000 و برای بخش خروجی کانال شرط مرزی فشار در خروجی در نظر گرفته می‌شود.

2-2- معادلات حاکم

معادلات حاکم به‌ترتیب در روابط (1) تا (3) ارائه شده‌اند [6]. همچنین مطابق روابط (4) تا (6) به‌منظور مدل‌سازی آشفتگی از مدل k-ε استاندارد استفاده می‌شود [7]. عدد ناسلت، عدد رینولدز، ضریب اصطکاک و شاخص معیار عملکرد پارامترهای بدون بعدی هستند که از روابط (7) محاسبه می‌شوند [8-10]. در معادله PEC، مقادیر Nu و Nu_0 به‌ترتیب عدد ناسلت متوسط در داخل کلکتور کنگره‌دار و عدد ناسلت متوسط در داخل کلکتور با صفحه جاذب صاف هستند. همچنین f و f_0 به‌ترتیب ضریب اصطکاک در داخل کلکتور کنگره‌دار و ضریب اصطکاک در داخل کلکتور با صفحه جاذب صاف هستند. خواص ترموفیزیکی هوا در جدول 1 نشان داده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u'_i u'_j}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right] \tag{3}$$

$$\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho k u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[\rho\varepsilon u_i] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k + C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

$$Nu = \frac{h\,D_h}{k_f}, \mathrm{Re} = \frac{\rho_f\, u_{in}\, D_h}{\mu_f}, D_h = 2H + \alpha, \tag{7}$$

$$f = \frac{2}{\left(\frac{L}{D_h}\right)}\frac{\Delta P}{\rho_{nf} u_{in}{}^2}, PEC = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1/3} \tag{8}$$

فشار هوا در شهر کاشان برابر 88588 Pa است [12]. ضریب عبور شیشه برابر 0.88 و ضریب جذب صفحه آلومینیومی با پوشش تیره برابر 0.95 است [13]. شار تشعشعی ورودی به پوشش شیشه‌ای برحسب متوسط ماهیانه تشعشع روزانه روی سطح افق ($\bar{H}$) و متوسط تعداد ساعات آفتابی روز (t) از رابطه (9) محاسبه می‌شود. شرایط مربوط به دو دوره شش ماهه سال در جدول 2 ارائه شده است.

$$Q = \frac{\bar{H}}{3600\,t} \tag{9}$$

2-3- راستی‌آزمایی

مطابق "شکل 2-الف"، چهار حالت شبکه‌بندی برای مدل با صفحه جاذب صاف در نظر گرفته شده است و شبکه با تعداد گره 149771 به‌عنوان شبکه

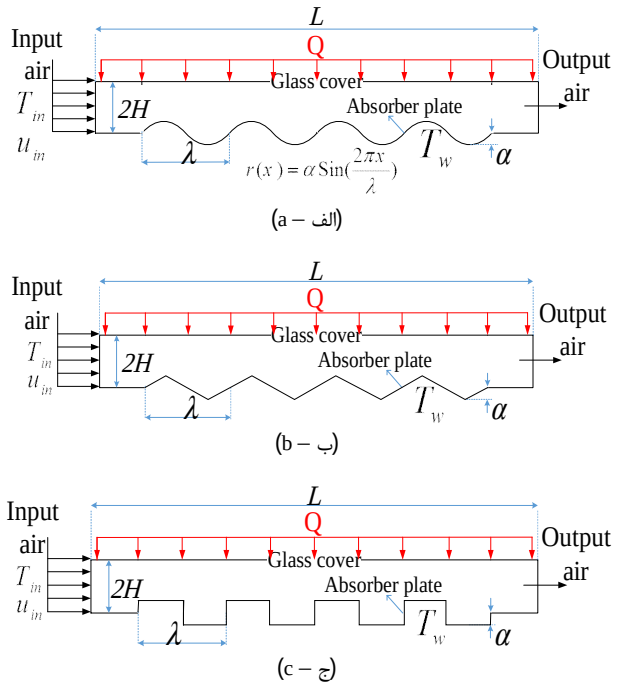


Fig. 1 Two dimensional solar collector models with: (a) sinusoidal corrugation, (b) triangular corrugation, and (c) rectangular corrugation. (The actual geometry consists of 18 corrugations but for clear presentation only 4 waves have been shown.)

شکل 1 نمای دوبعدی کلکتور خورشیدی مدل‌سازی شده (الف) کنگره سینوسی، (ب)کنگره مثلثی و (ج) کنگره مستطیلی. (هندسه واقعی شامل 18 موج می‌باشد اما برای نمایش بهتر در اشکال فوق تنها 4 موج نشان داده شده‌اند.)

جدول 1 خواص ترموفیزیکی هوا در دمای T=300K [11]

Table 1 The thermo-physical properties of air at T=300K [11]

ρ (kg·m^{-3})	c_p (J·kg^{-1}·K^{-1})	k (W·m^{-1}·K^{-1})	μ (N·s·m^{-2})
1.225	1006.43	0.0242	1.784·10^{-5}

جدول 2 شرایط مربوط به دوره‌های شش ماهه اول (بهار و تابستان) و دوم (پاییز و زمستان) سال [2]

Table 1 The characteristics of first (spring and summer) and second (autumn and winter) six months of the year [2]

دوره زمانی	بهار و تابستان	پاییز و زمستان
متوسط ساعات افتابی در روز (t)	10.25	7.6
متوسط دمای روزانه (K)	297	282
متوسط ماهیانه تشعشع روزانه روی سطح افق $\bar{H}$ (MJ·m^{-2}·day^{-1})	25.35	13.87
تشعشع ورودی به پوشش شیشه‌ای (W·m^{-2})	687	507
دمای صفحه جاذب (K)	355	345

[1] Performance Evaluation Criteria (PEC)
[2] Increase of air Temperature from Inlet to Outlet (ITIO)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.46.3]

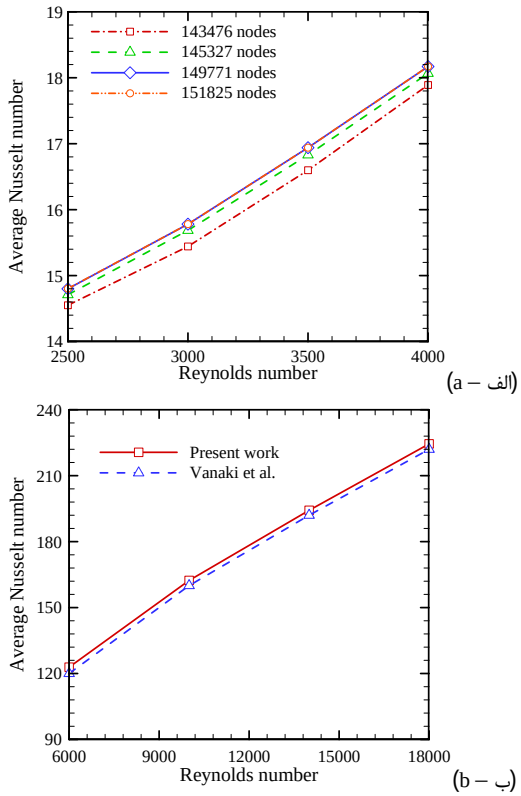


Fig. 2 (a) Mesh independency test, (b) Numerical model validation

شکل 2 (الف) آزمون استقلال نتایج از شبکه‌بندی، (ب) راستی‌آزمایی مدل عددی

قابل قبول از نظر دقت و صرفه‌جویی در زمان حل انتخاب شده است. همچنین به‌منظور اعتبارسنجی، نتایج کار حاضر و مطالعه [11] برای عدد ناسلت متوسط در "شکل 2-ب" با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل مشخص است، انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.

2-4- روش حل عددی

به منظور حل سیستم تک فاز، دوبعدی و پایا، از روش حجم کنترل استفاده می‌شود. فرض می‌شود جریان تراکم‌پذیر است و خواص سیال مستقل از دما هستند. با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل محاسبات عددی انجام می‌گیرد. ترم‌های نفوذ و جابه‌جایی با استفاده از روش تفاضل پسرو مرتبه دوم منفصل می‌شوند. به منظور همگرایی تمام متغیرها مقدار خطای 10^{-5} در نظر گرفته می‌شود.

3- ارائه نتایج

در این بخش اثرات استفاده از صفحه جاذب کنگره‌دار در اعداد رینولدز متفاوت بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی می‌شود. نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رینولدز برای دوره شش ماهه نخست و دوم سال به ترتیب در "شکل‌های 3-الف و 3-ب" نشان داده شده است. کانال کنگره‌دار مثلثی در شش ماه نخست و دوم سال بیش‌ترین عدد ناسلت متوسط را در تمامی اعداد رینولدز دارد. "شکل‌های 4-الف و 4-ب" مقادیر PEC را برحسب عدد رینولدز نشان می‌دهند. برای همه‌ی مدل‌ها در شش ماه نخست و دوم سال با افزایش عدد رینولدز میزان PEC کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد اما افت فشار نیز در حال رشد است. با این وجود افزایش عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز نمی‌تواند بر رشد افت فشار غلبه کند و منجربه کاهش PEC می‌شود. در نتیجه از نظر بیشینه PEC عدد رینولدز بهینه برای تمامی مدل‌ها 2500 است. کلکتور با صفحه جاذب سینوسی بیش‌ترین مقدار PEC را در بین تمامی مدل‌ها دارد که مقدار آن برای شش ماه نخست و دوم سال به‌ترتیب 1.08 و 1.06 است. همچنین "شکل‌های 5-الف و 5-ب" نمودار تغییرات ITIO را برای دوره‌های شش ماهه اول و دوم سال نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که برای دو دوره زمانی در نظر گرفته شده، افزایش دما در کلکتورهای کنگره‌دار بیش از کلکتورهای صاف است. در این بین کلکتورهای با کنگره مستطیلی در هر دو دوره شش ماهه اول و دوم سال افزایش دمای بیش‌تری از ورودی تا خروجی دارند. بیش‌ترین میزان افزایش دما در رینولدزهای پایین برای مدل کنگره مستطیلی حدود 63 K در شش ماهه اول و 59 K درشش ماهه دوم سال است.

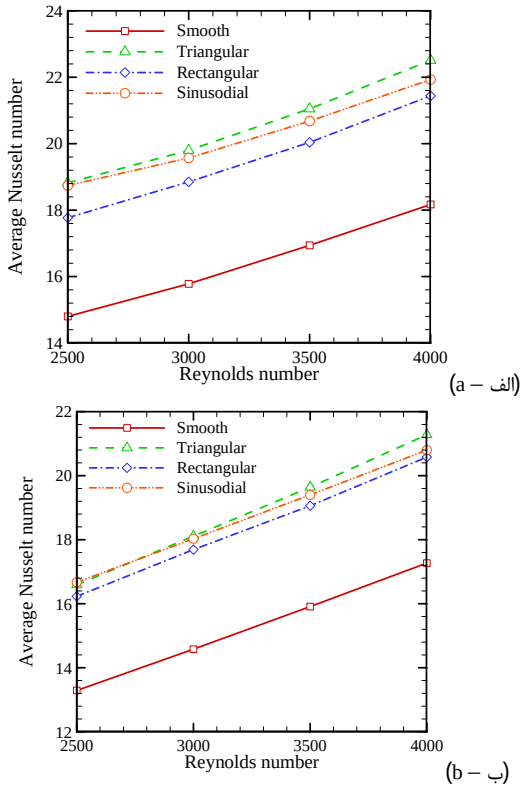
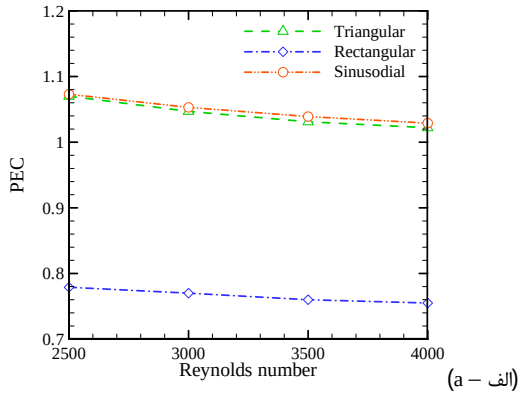


Fig. 3 Variation of average Nusselt number with Reynolds number during the (a) first and (b) second six months of the year

شکل 3 تغییر عدد ناسلت متوسط برحسب تغییرات عدد رینولدز در شش ماهه (الف) اول و (ب) دوم سال



[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.46.3]

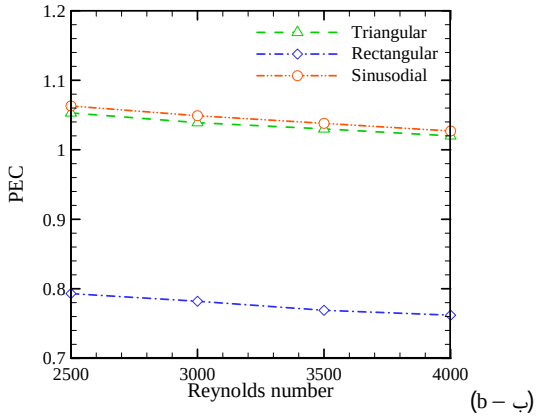


Fig. 4 Variation of PEC with Reynolds number during the (a) first and (b) second six months of the year

شکل 4 تغییر شاخص ارزیابی عملکرد با عدد رینولدز در دوره شش ماهه (الف) نخست و (ب) دوم سال

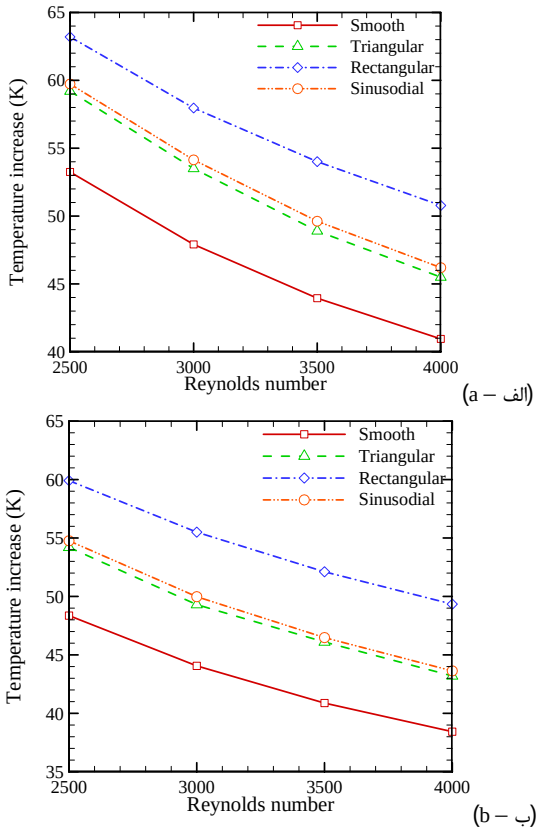


Fig. 5 Variation of ITIO according with Reynolds number during the (a) first and (b) second six months of the year

شکل 5 نمودار تغییرات افزایش دمای هوا از ورودی تا خروجی کلکتور برحسب اعداد رینولدز مختلف برای دوره شش ماهه (الف) نخست و (ب) دوم سال

4- نتیجه‌گیری

یک مطالعه عددی به‌منظور بررسی مشخصه‌های حرارتی و هیدرولیکی جابه‌جایی اجباری هوا در یک کلکتور هواگرم‌کن با صفحه جاذب کنگره‌دار برای رژیم جریان آشفته در محدوده رینولدزهای 2500 تا 4000 انجام شد. مطابق نتایج به‌دست آمده، کنگره‌دار شدن صفحه جاذب مشخصه‌های حرارتی نظیر عدد ناسلت و افزایش دما از ورودی تا خروجی را بهبود می‌بخشد، اما در مورد مشخصه‌های هیدرولیکی میزان تلفات را زیاد می‌کند. کلکتور داری صفحه جاذب با کنگره مستطیلی بیش‌ترین مقدار افزایش دما را از ورودی تا خروجی کلکتور در تمامی طول سال نتیجه می‌دهد اما به‌دلیل افت فشار بالا، از نظر شاخص PEC مناسب‌ترین حالت نیست. با این وجود کلکتور دارای صفحه جاذب با کنگره سینوسی از بیش‌ترین مقدار PEC در تمام طول سال برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد، از نظر افزایش دما از ورودی تا خروجی و بالاترین معیار ارزیابی عملکرد، برای همه هندسه های مطالعه شده رینولدز بهینه برابر 2500 است.

5- فهرست علایم

c_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
$ITIO$	افزایش دمای هوا از ورودی تا خروجی کلکتور (K)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)
PEC	شاخص معیار ارزیابی عملکرد ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u	سرعت ($m \cdot s^{-1}$)

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg \cdot m^{-3}$)

زیرنویس‌ها

in	ورودی به کلکتور
w	دیواره

6- مراجع

[1] Organisation for economic co-operation and development, *International Energy Association*, World energy (Outlook), 6 Jun 2011.
[2] H. Khorasanizadeh, M. Meschi, Determination of the monthly, seasonal, semi-yearly and yearly optimum tilt angles of flat plate solar collectors in Kashan. *Journal of Energy Engineering Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 38-49, 2014. (in Persian فارسی)
[3] T.A. Rush, T.A. Newell, A.M. Jacobi, An experimental study of flow and heat transfer in sinusoidal wavy passage, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 42, pp. 1541-1553, 1999.
[4] G.V. Wang, S, Vanka, Convective heat transfer in periodic wavy passages, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 3219-3230, 1995.
[5] P. Naphon, Effect of wavy plate geometry configurations on the temperature and flow distributions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 942-946, 2009.
[6] S. Eiamsa-ard, P. Promvonge, Numerical study on heat transfer of turbulent channel flow over periodic grooves, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 844-852, 2008.
[7] .E. Launder, D.B. Spalding, *Mathematical models of turbulence*, Academic press, New York, 1972.
[8] H. Heidary, M. Kermani, Effect of nanoparticles on forced convection in sinusoidal wall channel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1520-1527, 2010.
[9] H.A. Mohammed, A.K. Abbas, J.M. Sheriff, Influence of geometrical parameters and forced convective heat transfer in transversely corrugated circular tubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 116-126, 2013.
[10] Sh.M. Vanaki, H.A. Mohammed, A. Abdollahi, M.A. Wahid, Effect of nanoparticle shapes on the heat transfer enhancement in a wavy channel with different phase shifts, *Journal of Molecular Liquids*,

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.46.3]

Vol. 196, pp. 32-42, 2014.

[11] S. K. Jena, S. K. Mahapatra, Numerical modeling of interaction between surface radiation and natural convection of atmospheric aerosol in presence of transverse magnetic field, *Applied Mathemathical Modeling*, Vol. 37, pp. 527-539, 2013.

[12] *Meteorological Organization I.R. Of Iran*, Accessed on 26 May 2015, http://www.irimo.ir. (in Persian فارسی)

[13] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3rd Edition, New York: Wiley, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.13.46.3]