

شبیه‌سازی عددی هوا گرمکن‌های خورشیدی صفحه‌ای با در نظر گرفتن اثرات تابش گاز

عباس دهقانی راینی

سید عبدالرضا گنجعلیخان نسب

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

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

استاد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

هوا گرمکن‌های خورشیدی صفحه‌ای نمونه‌ای از مبادله‌کن گرمایی بوده که با جذب انرژی تابشی توسط صفحه جاذب و عبور هوا از روی این صفحات به طریق انتقال گرمای جابجایی، افزایش دمای هوا را باعث می‌شوند. در کار حاضر به‌عنوان اولین مطالعه صورت گرفته، رفتار حرارتی این نوع هوا گرمکن‌ها با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در این راستا معادله رسانش گرمایی برای پوشش شیشه‌ای، صفحه جاذب و لایه عایق به همراه معادله انرژی برای جریان گاز با استفاده از روش اختلاف محدود به‌صورت هم‌زمان حل شده‌اند. از آنجاکه جریان گاز به‌صورت تابشی می‌باشد معادله انتقال تابش با روش جهات مجزا به‌منظور توزیع شدت تابش و نهایتاً محاسبه جمله تابشی در معادله انرژی به جواب رسیده است. با این روش عددی، توزیع دما و همین‌طور توزیع شار تابشی در جریان گاز به دست آمده و سعی شده است که با فرض محیط تابشی (participating medium)، رفتار حرارتی سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه دمای جریان هوا در این نوع گرمکن‌ها بسیار بالا نیست ولی اثرات تابشی گاز، مشخصه‌های حرارتی سیستم را تحت تأثیر قرار داده به‌طوری که با افزایش عمق نوری از صفر (گاز غیر تابشی) تا ۲، نتایج عددی حدود ۷٪ افزایش در دمای گاز خروجی را نشان می‌دهند. مقایسه بین نتایج کار حاضر و داده‌های تجربی با خطای کمتر از ۳٪ رضایت‌بخش بوده است.

واژه‌های کلیدی: هواگرمکن خورشیدی صفحه‌ای، انتقال حرارت تابشی، ضخامت نوری

Numerical Simulation of Plate Solar Air Heater Considering Gas Radiation

A. Dehghani Rayeni
S.A. Gandjalikhan Nassab

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of kerman, Iran

Department of Mechanical Engineering Islamic Azad University of kerman, Iran

Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of kerman, Iran

Abstract

Solar air heater is a type of heat exchanger in which the incoming solar irradiation absorbs by the absorber plate and then this thermal energy transfers to the convective air flow through the heater. In this paper for the first time, the thermal behavior of solar gas heaters was numerically simulated with considering the radiative effect of working gas. The set of governing equations including the conduction equation for solid elements and the gas energy equation with radiative term was solved by the finite difference method (FDM). The radiative term in the gas energy equation was calculated by numerical solution of the radiative transfer equation (RTE) using the discrete ordinate method (DOM). With this numerical technique, the temperature and radiative flux distributions in the gas flow were obtained, while the working gas was considered as a participating medium. Numerical results showed the thermal characteristics of solar heater are much affected by gas radiation, although the gas temperature is not too high. In the studied test cases, about 7% increase in the gas outlet temperature was seen when the optical thickness increased from zero (non participating medium) to $\tau_0 = 2$. Comparison between the present numerical results with experimental data published in literature shows good consistency with relative error less than 3%.

Keywords: Solar plate air heater, Radiation heat transfer, Optical thickness.

این نوع گرمکن‌ها به دلیل پایین بودن ضریب انتقال گرمای جابجایی بین صفحه جاذب و هوای در حال عبور از بازدهی حرارتی کمی برخوردار هستند. مطالعات متعددی درباره این سیستم‌های حرارتی تا به حال صورت پذیرفته و روش‌های زیادی در جهت افزایش بازده حرارتی مورد توجه محققین بوده است. استفاده از پره‌ها یکی از اقدامات صورت گرفته است. نصب پره بر روی صفحه جاذب گرمکن خورشیدی علاوه بر اینکه باعث ازدیاد سطح انتقال حرارت بین جریان هوا و سطح داغ جاذب می‌شود به واسطه شکستن لایه مرزی گرمایی که به صورت مقاومتی در فرآیند انتقال

۱- مقدمه

هواگرمکن‌های خورشیدی به منظورهای متعددی شامل تأمین دمای مناسب و گرمایش محیط‌های بسته، فرایندهای خشک کردن در صنایع غذایی و کشاورزی و بسیاری از کاربردهای صنعتی متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. هواگرمکن‌های صفحه‌ای که نمونه‌ی متداولی می‌باشند شامل ساختار ساده‌ای مرکب از یک دمنده و یا مکنده‌ی هوا، پوشش شیشه‌ای و صفحه جاذب هستند که معمولاً جریان هوا به‌صورت یک عبوره و یا دو عبوره از بالا و پایین صفحه جاذب می‌گذرد. (شکل ۱)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ganj110@uk.ac.ir

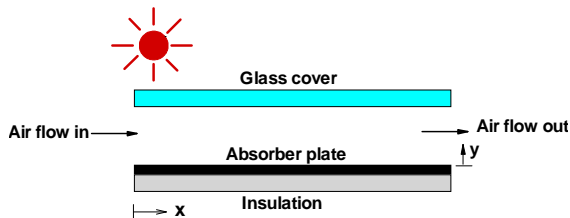
تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۲

لذا در کار حاضر سعی شده است با حل عددی معادله انرژی با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز توزیع دما و میزان انرژی جذب شده محاسبه گردد. از آنجاکه طول گرمکن های خورشیدی بسیار بیشتر از ضخامت جریان گاز است و با توجه به لایه‌ای بودن جریان گاز از توزیع سرعت گسترش یافته که به شکل سهموی است در حل معادله انرژی استفاده شده است. به منظور محاسبه جمله تابشی در معادله انرژی در جریان گاز، معادله انتقال تابش (Radiative transfer equation) با بکارگیری روش شناخته شده جهات مجزا (DOM) حل می‌گردد. بدیهی است به دلیل وابستگی بین متغیرهای موجود در مسئله، معادلات ذکر شده فوق بایستی به صورت همزمان حل عددی شوند. در نهایت سعی شده است که تأثیر ضخامت نوری جریان گاز بر مشخصه‌های حرارتی گرمکن خورشیدی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. نتایج عددی نشان دهنده تأثیر بسزای تابشی بودن گاز در بهبود عملکرد سیستم می‌باشد. بعلاوه با وارد شدن مکانیزم تابش در فرآیند انتقال گرما، دمای بیشینه صفحه جاذب کاهش یافته و میدان دمایی جریان گاز، فرم یکنواخت‌تری را به خود می‌گیرد.

۲- نظریه

در شکل ۲ طرحواره ای از ناحیه محاسباتی جهت شبیه‌سازی عددی هواگرمن خورشیدی صفحه‌ای به طول L نشان داده شده است که شامل پوشش شیشه‌ای به ضخامت δ_g ، جریان هوای گذرنده از مابین پوشش شیشه‌ای و صفحه جاذب به فاصله b از یکدیگر، صفحه جاذب به ضخامت δ_a و لایه عایق به ضخامت δ_{insul} می‌باشد.



شکل ۲- طرحواره ای از ناحیه محاسباتی

در هر کدام از ناحیه محاسباتی معادلات حاکم زیر قرار می‌باشند:
پوشش شیشه‌ای:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (1)$$

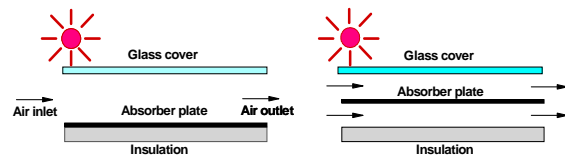
جریان هوا:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u c_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v c_p T) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \nabla \cdot \bar{q}_r \quad (2)$$

صفحه جاذب:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (3)$$

گرمای جابجایی نقش بازی می‌کند افزایش ضریب انتقال حرارت را به دنبال دارد. لذا بدیهی است که نصب پره افزایش انتقال گرمای جابجایی را در پی خواهد داشت اما واضح است که افت فشار جریان هوای گذرنده از هواگرمن در این شرایط زیاد خواهد شد. در نتیجه لازم است که طراحی بهینه‌ای در این خصوص انجام گیرد. توسط محققین متعددی مطالعات نظری و تجربی فراوانی در بررسی اثر نصب پره با هندسه‌های مختلف و چیدمان‌های متفاوت، [۴-۱]، استفاده از تکنیک برخورد جت هوا با صفحه جاذب [۵]، بکارگیری صفحات جاذب موجی و چین‌دار [۷-۶] و قرار دادن محیط متخلخل و مواد تغییر فاز دهنده در مسیر جریان هوا [۸-۱۲] و بهره‌گیری از صفحات جاذب سوراخ‌دار [۱۳] به انجام رسیده است.



شکل ۱- هواگرمن های خورشیدی صفحه‌ای یک عبوره و دو عبوره

اگرچه تا به حال تحقیقات وسیعی در مورد آنالیز و بررسی رفتار حرارتی هواگرمن های خورشیدی به عمل آمده است ولی در هیچ یک از آن‌ها اثرات تابشی گاز در شبیه‌سازی رفتار حرارتی لحاظ نشده است و دلیل این امر پایین بودن دمای جریان هوا در این گونه مبادله‌کن‌ها ذکر شده است. طبیعی است که گازهای حقیقی مانند هوا قادر به جذب، نشر و پخش انرژی تابشی می‌باشند اما در بسیاری از گازها، مخصوصاً گازهای سبک ضریب جذب، نشر و پخش تابش مقدار کمی را به خود اختصاص داده است. در مطالعه‌ای که توسط نویسنده دوم این مقاله در سال ۲۰۱۱ به عمل آمد، تأثیر اثرات تابشی هوا در فرآیند انتقال گرمای ترکیبی جابجایی- تابشی داخل یک محیط مربع شکل با دیوارهای گرم مورد مطالعه قرار گرفت و نتیجه گزارش گردید که حتی در دماهای نه چندان بالا و در حد دمای محیط، در نظر گرفتن هوا به عنوان یک محیط شرکت کننده در تابش (Participating Medium) توزیع دمای جریان و همین‌طور شار گرمایی دیواره‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. [۱۴] از آنجاکه دمای جریان هوا در هواگرمن های خورشیدی صفحه‌ای تا حد 50°C بیشتر از دمای محیط می‌رسد لذا انتظار می‌رود که در نظر گرفتن جریان هوا به عنوان یک محیط تابشی، مشخصه‌های حرارتی هواگرمن خورشیدی را تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی سیال عامل در این گونه مبادله‌کن‌ها در صورتی که چرخه بسته‌ای را طی نماید، بطوریکه حرارت جذب شده در داخل هواگرمن ناشی از تابش خورشیدی توسط مبادله‌کن گرمایی دیگری به محیطی که گرمایش آن مورد نظر است منتقل شود و یا اینکه سیال عامل دیگری این گرما را جذب نماید می‌توان بجای هوا از گازهای تابشی و سنگینی که دارای ضریب جذب و صدور تابشی زیادی هستند استفاده نمود. در این صورت انتظار می‌رود که با شارژ هواگرمن توسط یک گاز تابشی کارایی گرمکن های خورشیدی بهبود داده شود.

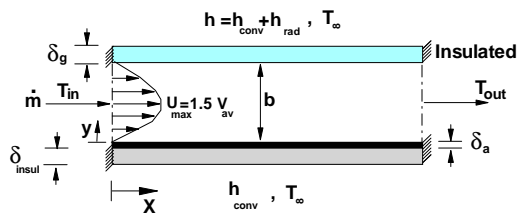
۲-۱- شرایط مرزی

حل عددی معادلات انرژی و انتقال تابش نیازمند اعمال شرایط مرزی بوده که در کار حاضر بدین صورت است که در تمامی سطوح مشترک داخلی شرط پیوستگی دما و شار گرمایی برقرار بوده است. در سطح خارجی پوشش شیشه‌ای شرط مرزی از نوع جابجایی اعمال شده که ضرایب انتقال گرما به صورت زیر به دست آمده‌اند:

$$h_{\text{rad}} = \sigma_{\text{eg}}(T_g^2 + T_{\infty}^2)(T_g + T_{\infty}) \quad (8)$$

$$h_{\text{conv}} = 5.67 + .68V_{\text{wind}} \quad (9)$$

برای معادله انرژی گاز، سیال با دمای مشخص و توزیع سرعت سهمی وارد کانال هواگرمکن شده و در مقطع خروجی شرط گرادیان صفر در جهت محوری برای دما در نظر گرفته شده است. در حل معادله انتقال تابش فرض شده که تمامی سطوح مرزی خاکستری بوده و در مقاطع ورودی و خروجی سطوح سیاه فرضی با توزیع دمای سیال در نظر گرفته شده است. نکته قابل توجه اینکه به عنوان یک شرط مرزی اساسی شدت تابش خورشیدی گذرنده از پوشش شیشه‌ای به شدت تابش گسیل شده از مرز مشترک که به سمت سیال روانه می‌شود اضافه شده است.



شکل ۳- دامنه محاسباتی با شرایط مرزی

۳- روش حل عددی

در فرآیند رسیدن به جواب، به دلیل اینکه حل عددی معادله انتقال تابش نیازمند معلوم بودن توزیع دما در محیط تابشی است لذا این معادله بایستی با معادله انرژی گاز و همین‌طور معادلات رسانش گرما در نواحی پوشش شیشه‌ای، صفحه جذب و لایه عایق به صورت همزمان حل گردد. در حل معادله انرژی و رسانش گرما در کار حاضر از روش اختلاف محدود (Finite Difference Method) استفاده شده است. در این راستا جملات پخششی (Diffusion terms) با تکنیک اختلاف مرکزی (Central differencing) به فرم مجزا درآمده‌اند؛ و در نهایت محاسبات عددی با تنظیم یک کد کامپیوتری به زبان فرترن انجام شده است.

روش حل عددی به این ترتیب بوده که در ابتدا جمله تابشی موجود در معادله انرژی معادل صفر در نظر گرفته شده و این معادله به همراه معادلات رسانش گرما در نواحی جامد حل شده‌اند. قابل ذکر است که از روش ماتریس سه قطری جهت محاسبه دما استفاده شده است. سپس معادله انتقال تابش با روش DOM به جواب رسیده و بدین صورت جمله

لایه عایق:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (4)$$

در معادله شماره (۱)، جمله چشمه گرمایی به دلیل جذب شار تابشی خورشیدی توسط شیشه بوده که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\dot{q} = \alpha_g \cdot q_{\text{sun}}''/b \quad (5)$$

که در این معادله α_g ضریب جذب تابشی پوشش شیشه‌ای بوده که معادل ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. معادله (۲) مربوط به جریان هوا بوده که با فرض جریان دائمی و تراکم ناپذیر لایه‌ای با صرف‌نظر از اتلاف لزج نوشته شده‌اند. آخرین ترم در سمت راست این معادله به واسطه اثرات تابشی گاز بوده که جهت محاسبه این جمله معادله انتقال تابش (RTE) بایستی به صورت عددی حل شود.

با توجه به اینکه اثرات تابشی هوا به عنوان یک گاز خاکستری با قابلیت جذب، صدور و پخش در محاسبات در نظر گرفته شده است، بنابراین بردار شار گرمایی تابشی در معادله انرژی ظاهر شده است. در معادله انرژی، جمله شار گرمایی تابشی $\nabla \cdot \vec{q}_r$ ، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = \sigma_a \left(4\pi I_b(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right), \quad (6)$$

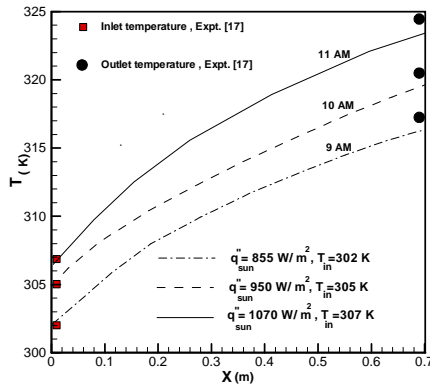
در این معادله σ_a ضریب جذب، $I(\vec{r}, \vec{s})$ شدت تابش با بردار مکان \vec{r} جهت \vec{s} و $I_b(\vec{r}) = \sigma(T(\vec{r}))^4/\pi$ شدت تابشی جسم سیاه است. به منظور محاسبه بردار شار تابشی و $\nabla \cdot \vec{q}_r$ حل معادله انتقال تابش (RTE) لازم است. این معادله برای یک محیط خاکستری، جذب‌کننده، پخش‌کننده و صادرکننده تابش به صورت زیر می‌باشد.

$$(\vec{s} \cdot \nabla) I(\vec{r}, \vec{s}) = -\beta I(\vec{r}, \vec{s}) + \sigma_a I_b(\vec{r}) +$$

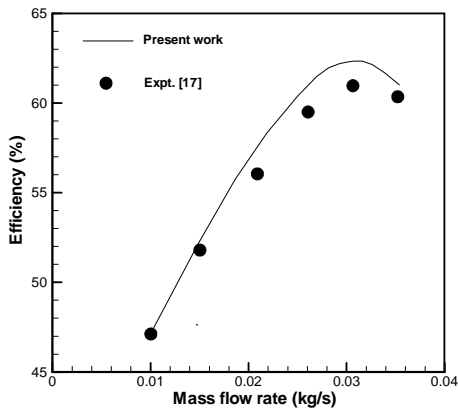
$$\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega', \quad (7)$$

جزئیات مربوط به روش راستای مجزا در حل معادله انتقال تابش به تفصیل در کار قبلی نویسنده دوم آمده است [۱۶]. در مطالعه حاضر، عمق نوری جریان گاز τ_0 که از حاصل ضرب ضریب میرایی (مجموع ضرایب پخش σ_s و ضریب جذب تابشی σ_a) در ضخامت لایه گاز به دست می‌آید به عنوان یکی از پارامترهای تابشی در مشخص نمودن قدرت تابش محیط مطرح است، به طوری که عمق نوری صفر نشان دهنده محیط غیر تابشی بوده و با افزایش ضریب جذب و پخش تابشی می‌توان از دید عمق نوری را باعث شد. پارامتر تابشی دیگری که در مورد محیط‌های تابشی، توانایی پخش تابشی را نشان می‌دهد ضریب پخش بدون بعد $\omega = \sigma_s / (\sigma_s + \sigma_a)$ بوده که برای محیط‌های کاملاً جذبی معادل صفر و برای محیط‌های کاملاً پخششی معادل یک می‌باشد.

هوا در مبدل به دلیل تبدیل انرژی تابشی به آنتالپی گاز در اثر انتقال گرمای جابجایی به‌وضوح مشخص است. داده‌های تجربی مشخص شده در این شکل مربوط به اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی بوده که برای سه ساعت مختلف با شکل‌های هندسی مشخص شده‌اند. در شکل ۴-ب راندمان هواگرمکن به ازای مقادیر مختلف دبی جرمی هوا در ساعت ۹ صبح محاسبه شده و مقایسه‌ای با نتایج آزمایشی صورت گرفته است. تفاوت بین به داده‌های تجربی و نتایج عددی نشان داده شده در شکل ۴ کمتر از ۳٪ می‌باشد.



الف: توزیع دما در مجرای هواگرمکن



ب: راندمان هواگرمکن

شکل ۴- نتایج عددی و داده‌های آزمایشی

۵- نتایج

در این بخش نتایج گزارش شده مربوط به رفتار حرارتی یک گرمکن خورشیدی است که کلیه مشخصات هندسی و همین‌طور جنس اجزای به کار رفته شبیه به مورد آزمایشگاهی است که در اعتبار سنجی از آن استفاده شده به غیر از طول گرمکن که معادل با یک متر لحاظ شده و شار تابشی خورشیدی معادل ۸۵۵ وات بر مترمربع است. در ابتدا برای نشان دادن شمای کلی از رفتار حرارتی گرمکن، میدان دما در تمامی نواحی آن در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل به‌خوبی مشخص است انرژی گرمایی از صفحه جاذب به عنوان داغ‌ترین المان گرمکن و از طریق انتقال گرمای جابجایی به سمت جریان هوا و

تابشی موجود در معادله انرژی تصحیح می‌گردد و روش عددی مذکور تا رسیدن به جواب نهایی ادامه پیدا می‌کند. خاطرنشان می‌سازد که در محاسبات حاضر از یک شبکه محاسباتی مجزا شده و سازمان‌یافته در حل معادلات انرژی و معادله انتقال تابش استفاده شده است. که پس از انجام مطالعه وابستگی جواب به شبکه محاسباتی طبق جدول شماره ۱ شبکه بهینه تعیین شده است. قابل ذکر است که مشخصات هواگرمکنی که در انجام مطالعه اثر اندازه شبکه محاسباتی شبیه‌سازی شده در جدول شماره ۲ درج گردیده است. به‌منظور بررسی تعداد تقسیمات شبکه در راستای محورهای x و y ، در جدول شماره ۱ دمای خروجی گاز و همین‌طور بیشترین دمای داخل هواگرمکن که روی سطح صفحه جاذب اتفاق می‌افتد در اندازه‌های مختلف شبکه محاسباتی مجزا شده محاسبه گردیده که طبق داده‌های به دست آمده شبکه بهینه با تقسیمات 160×800 تشخیص داده شده است.

جدول ۱- استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

اندازه شبکه	600×100	700×120	800×160	850×160
$T_{out} (^{\circ}C)$	۴۴/۴۵	۴۷/۶۶	۴۹/۰۳	۴۹/۱۰
$T_{max} (^{\circ}C)$	۱۰۳/۲۸	۱۰۸/۴۴	۱۱۲/۱۱	۱۱۲/۸۰

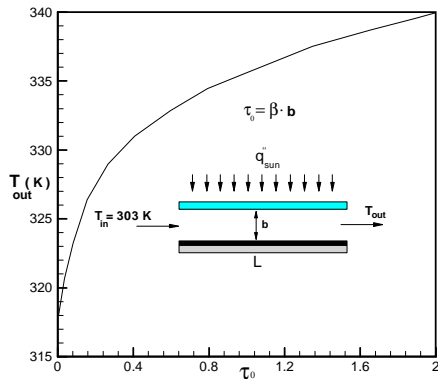
۴- اعتبار سنجی

به‌منظور بررسی صحت محاسبات انجام شده از داده‌های تجربی گزارش شده در مرجع [۱۷] استفاده شده است. در کار مذکور رفتار حرارتی هواگرمکن های خورشیدی صفحه‌ای در شرایط کارکرد مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل هندسی و موقعیت قرارگیری اجزای مختلف در هواگرمکن شامل پوشش شیشه‌ای، مجرای جریان هوا، صفحه جاذب و عایق زیر آن دقیقه همان است که در کار حاضر مدنظر بوده است. طول و عرض هواگرمکن به ترتیب ۷۰ و ۵۰ سانتیمتر بوده و دیگر مشخصات کامل هواگرمکن در جدول شماره ۲ گزارش شده است.

۲- مشخصات هواگرمکن خورشیدی

parameter	Value	Parameter	Value
δ_g	۳ mm	δ_a	۱/۲ mm
ϵ_g	۰/۹	ϵ_a	۰/۹۵
α_g	۰/۵	k_a	۸۰ W/mK
k_g	۰/۷۸ W/mK	δ_{insul}	۲ cm
k_{insul}	۰/۳۷ W/mK	B	۴ cm
\bar{V}_{air}	۰/۴ m/s	\dot{m}	۰/۱ kg/s
L	۷۰ cm	W	۵۰ cm

در شکل ۴-الف توزیع دمای میانگین هوا در طول گرمکن در سه ساعت مختلف از یک روز خورشیدی رسم شده است. نحوه افزایش دمای

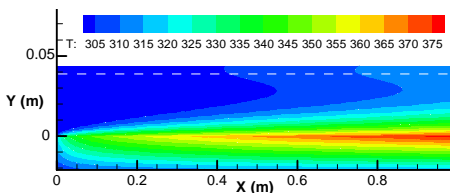


شکل ۷- توزیع دمای میانگین گاز در طول گرمکن به ازای عمق‌های نوری مختلف

در شکل شماره ۷ توزیع دمای گاز خروجی از گرمکن برحسب عمق نوری رسم شده است. همانطور که از نمودار مشخص است با افزایش عمق نوری و وارد شدن مکانیزم تابش به فرآیند انتقال گرما، دمای گاز خروجی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در حالت غیرتابشی ($\tau = 0$) دمای گاز خروجی ۳۱۷ کلوین و در حالت تابشی ($\tau = 2$) دمای مذکور به ۳۴۰ کلوین رسیده که افزایش ۷ درصدی دما را نشان می‌دهد. در کار حاضر، امکان استفاده از گازهای تابشی به جای هوا در گرمکن‌های خورشیدی صفحه‌ای به‌منظور افزایش بهره‌وری سیستم موردنظر بوده است. یک نوع از این گازها می‌تواند ترکیب هوا با دی‌اکسید کربن و بخار آب باشد. بدیهی است که با تغییر در صد وزنی این دو گاز تابشی در مخلوط هوا، ضخامت نوری محیط تابشی را می‌توان تغییر داد. که البته اثر تغییر ضخامت نوری گاز و اثر جذب و صدور تابشی در رفتار حرارتی گرمکن خورشیدی در شکل‌های ۶ و ۷ مطالعه شده است. پارامتر تابشی دیگری که در معادله انتقال تابش نیز ظاهر شده و می‌تواند اثرگذار باشد ضریب پخش (Scattering coefficient) است. که مقدار آن میزان توانایی محیط تابشی در پخش شار تابشی را نشان می‌دهد. در تمامی محاسبات قبلی و نتایج نشان داده شده، محیط تابشی به‌صورت غیر پخشی در نظر گرفته شده است. $\omega = \sigma_s / (\sigma_s + \sigma_a) = 0$.

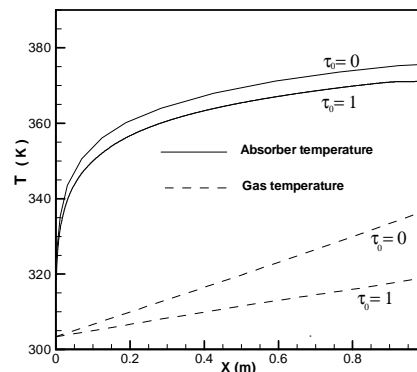
به‌منظور مطالعه اثر پخش در رفتار حرارتی گرمکن خورشیدی، در شکل ۸ توزیع دمای میانگین گاز در طول گرمکن به ازای مقادیر مختلف ω رسم شده است. دیده می‌شود که با افزایش ضریب پخش تابشی، دمای گاز در طول گرمکن روند نزولی به خود می‌گیرد. بدین دلیل که در ضخامت نوری ثابت، با افزایش ω ، محیط پخشی‌تر شده و توانایی آن در جذب شار تابشی کاهش می‌یابد. لذا پیشنهاد می‌شود که به‌منظور ارتقا کارایی گرمکن‌های خورشیدی از گازهای تابشی با ضریب جذب بالا و پخش کم استفاده شود.

همین‌طور از روش رسانش گرمایی به لایه عایق منتقل می‌گردد. به‌علاوه جریان هوا از طریق پوشش شیشه‌ای که مقداری از تابش خورشیدی را جذب نموده است انرژی حرارتی را دریافت می‌نماید. شکل ۵ نشان می‌دهد که بیشترین حرارت اتلافی در این نوع هواگرمکن‌ها از طریق لایه عایق به محیط اطراف منتقل می‌شود و به‌نوبه خود کاهش راندمان حرارتی دستگاه را به دنبال دارد.



شکل ۵- کانتور دما در تمام نواحی هواگرمکن خورشیدی ($\tau_0 = 0$)

توزیع دمای میانگین گاز و سطح جذب در طول گرمکن به ازای ضخامت نوری مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از این نمودارها مشخص است برای هر دو حالت گاز تابشی و غیر تابشی با پیشروی در طول کانال، دمای میانگین گاز و سطح جذب افزایش می‌یابند؛ اما ذکر این نکته ضروری است که افزایش دمای میانگین گاز در طول کانال به صورت خطی و دمای میانگین سطح جذب در ابتدای کانال غیرخطی می‌باشد و با شیب تندی افزایش می‌یابد و بعد از آن به صورت خطی تا انتهای گرمکن زیاد می‌شود. مقایسه دقیق شکل‌ها به‌خوبی نشان می‌دهد که برای حالتی که گاز تابشی است دمای میانگین گاز و سطح جذب بیشتر از حالتی است که گاز غیرتابشی می‌باشد. علت این نتیجه این است که در حالتی که گاز تابشی است علاوه بر مکانیزم انتقال گرما جابجایی، مکانیزم انتقال حرارت تابشی نیز وجود دارد و باعث نفوذ انتقال گرما از دیواره‌ها به داخل جریان گاز می‌شود. نکته قابل توجه دیگری که در شکل ۶ نمایان است اینکه با اضافه شدن مکانیزم تابش در جریان گاز، اختلاف دمای بین صفحه جذب و گاز عبوری کمتر شده که باعث افزایش کارایی سیستم، کاهش بازگشت‌ناپذیری در فرآیند انتقال گرما و نهایتاً باعث بیشتر شدن راندمان گرمکن خواهد شد.



شکل ۶- توزیع دمای میانگین گاز و دمای سطح جذب در طول گرمکن به ازای ضخامت‌های نوری مختلف

[5] Aboghraraa A M., Baharudina H T., Alghoulb M A., Adama N M., Performance analysis of solar air heater with jet impingement on corrugated absorber plate, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.10, pp. 111-120, 2017.

[6] Azharul Karima M D., Hawlader M N A., Performance investigation of flat plate, v corrugated and finned air collectors. *Energy*, Vol. 31, pp. 452–70, 2006.

[7] Wenfeng G., Wenxian, L., Tao L., Chaofeng X., Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters. *Applied Energy*, Vol. 84, pp. 425–441, 2007.

[8] Satyender S., Dhruw L., Chander S., Experimental investigation of a double pass converging finned wire mesh packed bed solar air heater. *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 713-723, 2019.

[9] Satyender S., Experimental and numerical investigations of a single and double pass porous serpentine wavy wire mesh packed bed solar air heater. *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1361-1387, 2019.

[10] Alkilani M M., Sopian K., Sohif M., Alghoul M., Output air temperature prediction in a solar air heater integrated with phase change material. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 27, pp. 334-341, 2009.

[11] Krishnananth S S., Kalidasa Murugavel K., Experimental study on double pass solar air heater with thermal energy storage. *Journal of King Saud University*, Vol. 25, pp. 135–40, 2013.

[12] Anil K., Saini R P., Saini J S., A review of thermo-hydraulic performance of artificially roughened solar air heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 37, pp. 100-122, 2014.

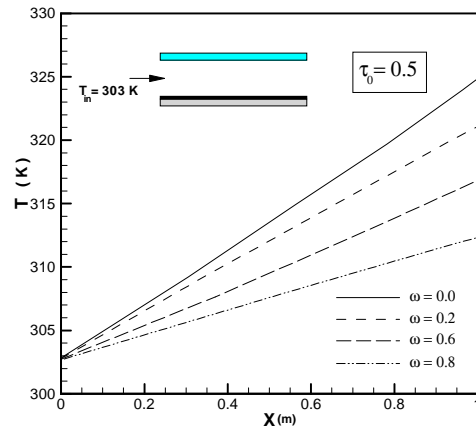
[13] Chan H Y., Vinson A A., Baljit S S S., Ruslan M H., Comparison of thermal performances between low porosity perforate plate and flat plate solar air collector. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series* 989 012001, 2018

[14] K. Lari K., Baneshi M., Gandjalikhan Nassab S A., Komiya A., Maruyama S., Combined heat transfer of radiation and natural convection in a square cavity containing participating gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 23, pp. 5087–5099, 2011.

[15] Modest F., *Radiative Heat Transfer*. Academic press, California, 2013.

[16] Foruzan Nia M., Gandjalikhan Nassab S A., Ansari, A B., Transient combined natural convection and radiation in a double space cavity with conducting walls. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 128, pp. 94-104, 2018.

[17] Noureddine M., Brima A., Experimental study of thermal efficiency of a solar air heater with an irregularity element on absorber plate, *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 855-860, 2018.



شکل ۸- توزیع دمای میانگین گاز در طول گرمکن به ازای ضرایب پخش متفاوت

۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، رفتار حرارتی هواگرمکن های خورشیدی با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. بدین منظور معادله انرژی برای جریان گاز به همراه جمله تابشی با استفاده از روش اختلاف محدود حل شده‌اند. برای قسمت‌های جامد در سیستم، معادله رسانش گرمایی به منظور محاسبه توزیع دما مدنظر بوده است. نتایج عددی نشان دهنده تأثیر بسزای نقش اثر تابشی گاز در بهبود عملکرد گرمکن می‌باشد چراکه علاوه بر انتقال انرژی حرارتی از صفحه جاذب گرمکن به طریق جایابی، گاز تابشی می‌تواند مستقیماً انرژی تابشی خورشیدی و همچنین انرژی تابشی صادرشده از سطح صفحه جاذب را جذب نماید. به طوری که با افزایش عمق نوری گاز عبوری از گرمکن، بخصوص برای گازهای غیر پخشی، افزایش قابل توجهی در دمای خروجی واقع می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Chabane F., Noureddine M., Benramache S., Experimental study of heat performance with longitudinal fins of solar air heater. *Journal of Advanced Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 183–192, 2014.
- [2] Prashant D., Thakur N S., Chauhan S R., Thermal and thermo-hydraulic performance of counter and parallel flow packed bed solar air heaters. *Renewable Energy*, Vol. 46, pp. 259–68, 2012.
- [3] Kavak Akpinar E., Koçyiğit F., Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different obstacles on absorber plates. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol.37, pp. 416–21, 2010.
- [4] Oztop Hakan F., Hepbaslic A., Energy and exergy analyses of porous baffles inserted solar air heaters for building applications. *Energy Building*, Vol. 57, pp. 338–45, 2013.