



ساخت و مدل سازی حرارتی کلکتورهای هوایی مشبک خورشیدی با صفحات جاذب فلزی (استیل) و غیر فلزی

فاطمه افضل¹، حسین امیری^{2*}، وحید نخعی¹، مهران عامری³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

* کرمان، صندوق پستی 117-76315، h.amiri@kgut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 خرداد 1396

پذیرش: 22 مرداد 1396

ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:

کلکتور خورشیدی

کلکتور مشبک بدون پوشش

هوا گرم کن

انرژی خورشیدی

صفحات جاذب غیرفلزی

کلکتورهای هوایی مشبک بدون پوشش خورشیدی تکنولوژی‌های نسبتاً نوبنی هستند که می‌توان از آن‌ها به‌منظور گرمایش ساختمان‌ها و فضاهای بزرگ، خشک کردن محصولات کشاورزی و صنعتی استفاده نمود. در این کلکتورها هوا به‌وسیله صفحات جاذب مشبک (سوراخ‌دار) معمولاً فلزی گرم می‌شود. هزینه خرید و آماده‌سازی صفحات جاذب سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های این نوع از کلکتورها را به خود اختصاص می‌دهد. در تحقیق حاضر به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری به بررسی و ارزیابی کارایی صفحات جاذب غیرفلزی موجود در بازار ایران به‌عنوان جایگزین صفحات جاذب استیل (فلزی) پرداخته شده است. بدین منظور سه کلکتور با صفحات جاذب استیل (فلزی)، پلی‌کربنات و پلاستیک - فشرده طراحی، ساخته و در سه دبی هوا مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. علاوه بر این یک مدل آنالیز حرارتی بر پایه قانون اول ترمودینامیک از رفتار این کلکتورها با در نظر گرفتن تمامی روش‌های انتقال حرارت (شامل رسانایی، جابجایی و تابش) توسعه داده شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان دادند که در هر سه دبی مورد بررسی همخوانی بسیار خوبی بین نتایج تجربی و نتایج مدل آنالیز حرارتی وجود دارد به‌طوری‌که خطای نسبی متوسط در تخمین دمای خروجی از کلکتور برای اکثر شرایط کاری کمتر از 5 درصد بود. علاوه بر این، نتایج نشان داد اختلاف زیادی بین کارایی سه کلکتور خصوصاً برای دبی‌های کم وجود ندارد. با این وجود برای شرایط بررسی‌شده کلکتور استیل بهترین کارایی و کلکتور پلی‌کربنات پایین‌ترین کارایی را داشت. کارایی و بازده کلکتور پلاستیک‌فشرده بسیار نزدیک کلکتور استیل بود و با توجه به مزایای کلکتورهای غیرفلزی استفاده از آن به‌جای کلکتورهای فلزی پیشنهاد می‌شود.

Fabrication and Thermal Modeling of Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors with metallic (steel) and non-metallic absorber plates

Fatemeh Afzali¹, Hossein Amiri^{1*}, Vahid Nakhaei¹, Mehran Ameri²

1- Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Department of Mechanic Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

* P.O.B. 76315-117, Kerman, Iran, h.amiri@kgut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 June 2017

Accepted 13 August 2017

Available Online 08 September 2017

Keywords:

Unglazed Transpired Collectors

Air heaters

Solar Energy

Non-Metallic Absorber

ABSTRACT

Unglazed transpired solar air heater collectors are relatively new solar technologies that can be used for air heating or pre-heating ventilation air and drying agricultural and industrial products. Passing air through the perforated plate, which is usually metallic is the main mechanism of heat transfer. The cost of buying and preparing the absorber plate is the dominant share of costs allocated to this type of collector. In the present study, performance of non-metallic absorber plates available in the Iranian market, as an alternative to metal absorber plates are examined experimentally and theoretically. Therefore, three collectors with Metallic, Polycarbonate and Compressed-Plastic are designed, fabricated and tested in real conditions. In addition, a thermal model based on the first law of thermodynamics is developed for these collectors. In this model, all modes of heat transfer (including conduction, convection and radiation) are considered. Results show that there is a good agreement between experimental and theoretical results (for most test conditions, average relative error in estimation of the outlet temperature of the collectors is less than 5%). The results showed that the performance of three collector's, especially for low mass flow rates, was not so different. However, for considered condition Steel (metallic) collector has the best performance and the polycarbonate collector the worse performance. The performance of the Compressed-plastic was close to the Steel collector and given the low cost of non-metallic collectors, it can be used as a convenient alternative to metal collectors.

Please cite this article using:

F. Afzali, H. Amiri, V. Nakhaei, M. Ameri, Fabrication and Thermal Modeling of Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors with metallic (steel) and non-metallic absorber plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 339-350, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی که موجب افزایش صدور گازهای گلخانه‌ای و دیگر آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود از یک سو و مشکل رو به اتمام بودن منابع سوخت‌های فسیلی در آینده نزدیک از سوی دیگر، موجب شده در جهان رویکرد جدیدی نسبت به استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر پیدا شود. یکی از اصلی‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشید است که منبع مستقیم تقریباً تمام انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. انرژی موجود در پرتوهای خورشید را می‌توان به روش‌های مختلفی استحصال کرد. یکی از تکنولوژی‌های مربوط در این زمینه، کلکتورهای خورشیدی می‌باشند. انواع کلکتورهای خورشیدی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند که شامل کلکتورهای تخت، کلکتورهای تحت خلأ و کلکتورهای متمرکز کننده می‌باشند. از میان انواع کلکتور، کلکتورهای تخت ساده‌ترین و پرکاربردترین‌ها هستند.

کلکتورهای مشبک بدون پوشش (نفوذی) خورشیدی¹ که در اوایل دهه 1990 میلادی معرفی شدند [1]، نوعی هواگرم‌کن خورشیدی می‌باشند که استفاده از آن‌ها یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش بار تپهویه مطبوع در ساختمان‌هاست. علاوه بر این، از این کلکتورها می‌توان برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی استفاده نمود. جزء اصلی این کلکتورها، صفحه جاذب مشبک معمولاً به رنگ تیره (سیاه) است که می‌تواند از جنس‌های مختلفی ساخته شود و منافذی به صورت شیار یا سوراخ بر روی آن ایجاد تعبیه می‌شود. عملکرد این کلکتورها بر پایه مکش هوا از درون منافذ صفحه جاذب به دلیل فشار منفی ایجاد شده توسط فن مکنده است که هوای مکیده شده، هنگام عبور از سوراخ‌ها گرمای صفحه را جذب کرده و توسط دمنده در ساختمان پخش می‌شود. به دلیل مکش هوا از روی صفحه جاذب، لایه مرزی بر روی این صفحه از بین رفته و تلفات حرارتی از این صفحه به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. در نتیجه، این کلکتورها برعکس کلکتورهای هوا گرم‌کن معمول، به پوشش شفاف نیاز ندارند. به همین دلیل، هزینه آن‌ها کمتر و دارای بالاترین راندمان برای گرمایش هوا می‌باشند [1]. با توجه به بازده بالا، این کلکتورها جایگزین خوبی برای کلکتورهای صفحه تخت هستند. مطالعات متعددی بر روی کلکتورهای مشبک انجام شده است. بیشتر مطالعات انجام گرفته، بر روی انتقال حرارت موجود در صفحه مشبک متمرکز شده و هدف بیشتر کارهای پژوهشی انجام شده، بهبود انتقال حرارت این کلکتورها است. آرولاناندام و همکاران [2] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات بر روی یک صفحه با سوراخ‌هایی با الگوی مربعی در حالت بدون وزش باد رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب مؤثر مبدل حرارتی به‌دست آوردند و رابطه‌ای تجربی را برای محاسبه عدد ناسلت ارائه نمودند. فلک و همکاران [3] به‌صورت تجربی اثر باد بر روی کلکتورهای خورشیدی مشبک بدون پوشش را مورد مطالعه قرار دادند. گاولیک و همکاران [4] کلکتورهای مشبک با رسانایی حرارتی متفاوت (آلومینیوم و استایرین) را به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که رسانایی مواد اثر کمی بر کارایی حرارتی این دستگاه‌ها دارد. لیون و کومار [1] با ارائه یک مدل ریاضی برای محاسبه حرارتی این دستگاه‌ها، اثر پارامترهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. مطهر [5] به بررسی کلکتورهای خورشیدی مشبک بدون پوشش بر پایه آنالیز انرژی پرداخت و دریافت که پارامترهای قطر، گام روزنه‌ها، شدت تابش و سرعت مکش، تأثیر معناداری در کارایی این کلکتورها دارند. غلامپور و عامری [6] به بررسی ملاحظات طراحی در کلکتورهای خورشیدی مشبک

¹ Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors

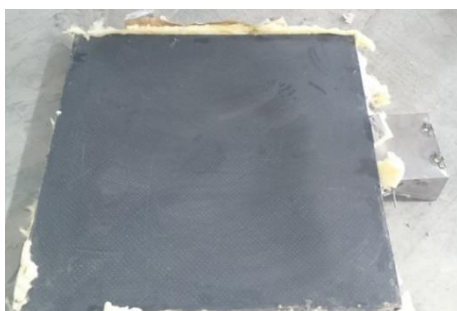
بدون پوشش بر پایه مطالعات انرژی و انرژی پرداختند و پارامترهای مؤثر در کارایی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که تحلیل انرژی در طراحی این کلکتورها دارای اهمیت فراوانی است. تاج‌آذران و همکاران [7] با استفاده از یک روش عددی، پارامترهای سرعت و جهت باد، جریان غیریکنواخت و مغشوش، شدت تابش و موقعیت خورشید و نرخ مکش جریان را بررسی کرده و نشان دادند که فاکتورهایی مثل زاویه باد، اثرات قابل توجهی بر عملکرد حرارتی این دستگاه‌ها دارد و اثر نسبت مکش در سرعت‌های باد پایین‌تر افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند، همان‌طور که انتظار می‌رود، با تغییر موقعیت خورشید در طول روز (ساعت روز)، دمای عملکرد کلکتور متفاوت خواهد بود. وزیری و همکاران [8] به‌صورت تجربی، عملکرد حرارتی هواگرم‌کن‌های خورشیدی مشبک با پوشش بارنگ‌های متفاوت داخلی کلکتور و یک کلکتور مشبک بدون پوشش بارنگ تیره مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که راندمان حرارتی کلکتور خورشیدی با پوشش حتی در روشن‌ترین رنگ از کلکتور بدون پوشش بیشتر است. کولینس و ابوالخیر [9] با استفاده از یک مدل سه بعدی به بررسی عددی کلکتورهای مشبک جدید با صفحات جاذب راه راه دوزنقه‌ای پرداختند. باداچه و همکاران [10] به‌صورت عددی به شبیه‌سازی دوبعدی کلکتورهای هوایی مشبک خورشیدی بدون شیشه پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در دبی‌های کم انتقال حرارت از جلوی صفحه جاذب بیشترین سهم از انتقال حرارت به هوا را دارد ولی با افزایش دبی سهم انتقال حرارت از پشت صفحه افزایش می‌یابد. مروری بر مطالعات انجام شده بر روی کلکتورهای مشبک توسط شوکلا و همکاران [11] انجام شده است. آن‌ها در این تحقیق انواع مختلف این نوع از کلکتورها، اصول کارکرد، روش‌های مدل‌سازی و مطالعات انجام شده بر روی این کلکتورها را مرور کرده‌اند. همچنین یک سری بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی بر روی کلکتورهای مشبک بدون پوشش ترکیبی با پنل‌های فتوولتائیک صورت گرفته است. هالیک [12] گزارشی از یک پروژه تحقیقاتی جهت ارزیابی عملکرد کلکتورهای مشبک بدون پوشش خورشیدی ارائه داد. این گزارش نشان داد که پنل‌های فتوولتائیک نصب شده بر روی دستگاه‌های کلکتور مشبک عملکرد بهتری نسبت به دستگاه‌های معمول فتوولتائیک دارند. نوید و همکاران [13] عملکرد پنل‌های فتوولتائیک را در دو حالت معمول و نصب شده بر روی کلکتور مشبک را مقایسه کردند. آتینایتس و همکاران [14] دستگاه‌های کلکتور مشبک با و بدون پنل فتوولتائیک را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند.

هرچند مطالعات زیادی در خصوص کلکتورهای هوایی مشبک خورشیدی صورت پذیرفته است ولی هنوز مسائل زیادی در مورد این کلکتورها باقی‌مانده که باید برطرف شوند. از موضوعاتی که در مورد این کلکتورها مطرح است هزینه نسبتاً زیاد صفحات جاذب و سوراخ‌کاری آن‌ها و مشکلات خوردگی صفحات و سنگین بودن مجموعه کلکتورهای فلزی می‌باشد. استفاده از صفحات جاذبی که به فراوانی در بازار موجود باشند و هزینه کمی داشته و سبک بوده و در برابر خوردگی مقاوم باشند، می‌تواند فراگیر شدن این نوع کلکتورها کمک کند. در همین راستا در تحقیق حاضر برای اولین بار کارایی کلکتورهایی با صفحات جاذب پلاستیک فشرده و پلی‌کربنات که به فراوانی در بازار ایران در دسترس هستند با یکدیگر و با کلکتور با جنس صفحه جاذب استیل (فلزی) مقایسه شده‌اند. این دو کلکتور نسبت به کلکتورهای فلزی دارای سه ویژگی سبک بودن، کم هزینه بودن و ضدزنگ بودن هستند. علاوه بر این یک مدل براساس آنالیز حرارتی بر پایه قانون اول ترمودینامیک برای پیش‌بینی رفتار این کلکتورها با در نظر گرفته

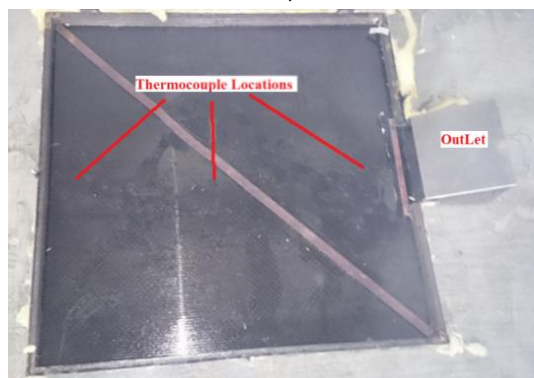
صفحه جاذب در سه نقطه و به وسیله سه ترموکوپل گونه-تی² متصل به دیتالاگر پروا (دقت دستگاه $\pm 0.5^\circ\text{C}$) اندازه گیری شده است. در "شکل 1" مکان های نصب ترموکوپل ها، نشان داده شده است. برای محاسبه دبی جرمی هوا نیاز به سرعت هوا می باشد که با استفاده از دستگاه سرعت سنج تستو مدل 435 (با دقت $\pm 0.1 \text{ ms}^{-1}$) اندازه گیری شده است. شدت تابش رسیده به کلکتور به وسیله تشعشع سنج (پیرانومتر) کیپ-اند-زونن مدل CMP6 (با دقت $\pm 4 \text{ Wm}^{-2}$)، که در شیب کلکتور نصب شده، اندازه گیری شده است. با توجه به این که آزمایش ها در شهر کرمان و در شهریور ماه انجام شده اند کلکتورها در زاویه شیب بهینه برای عرض جغرافیایی این منطقه و در این ماه سال که برابر با 6 درجه رو به جنوب می باشد، نصب شده اند. آزمایش ها از 9 صبح تا 15 بعد از ظهر انجام گرفته و از زمان شروع آزمایش، داده ها هر 20 دقیقه یکبار ثبت شدند. همچنین در تمام طول مدت آزمایش دبی خروجی



(الف) (a)



(ب) (b)



(ج) (c)

Fig.1 a) Pictures of the Polycarbonate and b) the Compressed-Plastic collectors in the process of fabrication and c) a picture of the inside of the polycarbonate collector and locations of thermocouple

شکل 1 عکس الف) کلکتور پلی کربنات و عکس ب) کلکتور پلاستیک فشرده در حال ساخت و ج) عکسی از داخل کلکتور پلی کربنات و محل نصب ترموکوپل ها

تمامی روش های انتقال حرارت توسعه داده شده است. با این مدل اثر جنس (ضریب هدایت حرارتی) صفحات جاذب، دبی مکش و شدت تابش، بر راندمان و عملکرد حرارتی کلکتورها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با داده های تجربی مقایسه شده است.

2- ساخت و آزمایش کلکتورها

اجزای اصلی کلکتور مشبک خورشیدی، صفحه جاذب مشبک، صفحه پشتی، فن (مکنده) و قاب نگهدارنده (فریم) می باشند. صفحه جاذب و صفحه پشتی به وسیله فریم فلزی به صورت موازی با یکدیگر قرار گرفته و از اطراف عایق کاری می شوند. به فضای بین دو صفحه، فضای "پر" یا "پلنوم"¹ می گویند و از آن جایی که عمق پلنوم بر افت فشار اصطکاکی تأثیرگذار است باید به گونه ای انتخاب شود که این افت به حداقل برسد. یکی دیگر از اجزای اصلی این کلکتورها، فن مکنده است که دبی جریان و افت فشار در صفحه جاذب، توسط آن تنظیم می شود. برای ایجاد جریان یکنواخت افت فشار باید حداقل 25 پاسکال بر روی صفحه جاذب باشد [15]. مهم ترین جزء یک کلکتور خورشیدی مشبک، صفحات جاذب آن هستند. معمولاً به دلیل ضریب رسانایی خوب فلزات، این صفحات از جنس فلز (آهن ضد زنگ یا استیل) سیاه شده ساخته می شوند. همان طور که در مقدمه گفته شد به دلیل مشکلات موجود این صفحات، در این تحقیق چند صفحه جاذب مختلف به عنوان جایگزین صفحات جاذب فلزی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

با توجه به بررسی های انجام شده بر روی صفحه های موجود در بازار دو صفحه با جنس های پلی کربنات و پلاستیک فشرده انتخاب شده که رنگ هر دو صفحه تیره و جاذب نور هستند. بعد از تهیه این صفحات، سطح آن ها با استفاده از مته فولادی برای سوراخ کاری ابزار دقیق، سوراخ شده است. چیدمان سوراخ ها مثلثی است و با فاصله 12 میلی متر از یکدیگر قرار گرفته اند. بعد از ساخت صفحات جاذب، این صفحات در قاب فلزی آماده شده، قرار داده و بعد از عایق بندی از جهت نشت هوا، از نظر حرارتی هم با استفاده از پشم شیشه عایق بندی شده اند. به منظور ارزیابی این دو کلکتور، یک کلکتور استیل با همان مشخصات هندسی ساخته و با رنگ سیاه کوره ای (ضد انعکاسی) رنگ شده است. مشخصات ترموفیزیکی و هندسی این کلکتورها در جدول 1 ارائه شده است. جابجایی هوا در این نوع کلکتورها از نوع جابجایی اجباری بوده، بدین منظور در کانال خروجی کلکتور محلی برای قرار دادن دو فن به ابعاد 12×12 سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. این دو فن قادرند هوا را با دبی های مختلف 0.011، 0.0088، 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه مکش نمایند. "شکل 1" عکس هایی از کلکتور پلی کربنات و پلاستیک فشرده ساخته شده را نشان می دهد.

بررسی هزینه نشان می دهد که هزینه بر واحد مترمربع صفحات پلاستیک فشرده و پلی کربنات حدود 50 درصد هزینه صفحه استیل و هزینه سوراخ کاری آن ها حدود 60 درصد هزینه صفحه استیل می باشد. در مجموع هزینه های کلکتور پلاستیک فشرده و پلی کربنات ساخته شده حدود هشتصد هزار تومان (800000 تومان) و حدود یک میلیون و صد هزار تومان (1100000 تومان) برای کلکتور استیل می باشد.

مهم ترین بخش هر آزمایش قسمت ثبت دقیق پارامترهای اندازه گیری می باشد. در آزمایش های انجام شده پارامترهای مهم اندازه گیری عبارتند از: دبی جرمی جریان، سرعت جریان، شدت تابش خورشید و دما که شامل دمای خروجی، دمای محیط و دمای نقاط مختلف سطح جاذب می باشد. دمای

² T-type¹ plenum

جدول 1 مشخصات ترموفیزیکی صفحات جاذب و ابعاد کلکتورها

مقدار	پارامترهای ورودی
0.9	ضریب جذب کلکتور استیل (فلزی)
0.84	ضریب جذب کلکتور پلی کربنات
0.92	ضریب جذب کلکتور پلاستیک
0.85	ضریب صدور صفحه پشت
0.26	ضریب صدور سطح داخلی کلکتور
0.7	قطر سوراخها (mm)
12	گام سوراخها (mm)
6	ضخامت صفحه پلی کربنات (mm)
0.5	ضخامت صفحه استیل (فلزی) (mm)
3.6	ضخامت صفحه پلاستیکی (mm)
6	عمق پلنوم (cm)

کلکتورها ثابت بوده است. با توجه به محدود بودن دستگاه‌های اندازه‌گیری، در هر روز فقط داده‌های دو کلکتور قابل ثبت بوده‌اند. بنابراین مقایسه بین کلکتورها دوبه‌دو انجام شده است.

3- آنالیز حرارتی

از آنجایی که حل معادلات حاکم بر رفتار سیال در کلی‌ترین حالت آن بسیار پیچیده و برای مسائل واقعی عملاً غیرممکن می‌باشد، معمولاً با توجه به دقت و جزئیات موردنیاز از حرکت سیال، با استفاده از فرضیاتی این معادلات ساده‌تر شده و حل می‌شوند. در این تحقیق از آنجایی که هدف از مدل‌سازی درک رفتار کلی سیال بوده فرضیات زیر در نظر گرفته شدند:

- 1- سرعت مکش در همه نقاط صفحه مشبک یکسان فرض شد است.
- 2- جریان برگشتی از میان صفحه جاذب قابل چشم‌پوشی است.
- 3- جاذب به‌صورت جسم خاکستری و دیفیوز در نظر گرفته می‌شود.
- 4- از تلفات حرارتی لبه پلنوم صرف‌نظر شده است.
- 5- هوا به‌صورت گاز ایدئال در نظر گرفته شده است.
- 6- مدل‌سازی به‌صورت صفر بعدی انجام شده و از تغییرات مکانی دمای صفحه جاذب، صفحه پشتی و داخل هوای پلنوم صرف‌نظر شده است.

3-1- معادلات حاکم

مکانیسم‌های مختلفی در جریان انرژی در کلکتور نقش دارند. تابش خورشید به صفحات جاذب برخورد کرده و قسمتی از آن جذب شده و مابقی آن انعکاس می‌یابد. قسمتی از انرژی جذب شده توسط صفحات جاذب به‌وسیله مکانیسم جابجایی و در طی مسیر حرکت هوای مکیده شده (جریان یافته) بر رو و پشت صفحات جاذب و در داخل سوراخ‌ها، به هوا منتقل می‌شود. قسمت دیگری از انرژی جذب شده، توسط انتقال حرارت تشعشعی به صفحه پشتی منتقل می‌شود و مابقی، از طریق فرآیند تشعشع و جابجایی به محیط اطراف منتقل و تلف می‌گردد. در "شکل 2" روش‌های انتقال حرارت بین اجزاء سیستم با یکدیگر و با محیط نشان داده شده است. با توجه به فرضیات ذکر شده در بخش قبل، معادله بقاء انرژی برای سه قسمت اصلی کلکتور شامل صفحه جاذب، صفحه پشتی و پلنوم به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$m_{abs} C_{p,abs} \left(\frac{dT_{abs}}{dt} \right) = (\alpha_{abs} I_T A_{abs}) - bQ_{conv,abs-air} + Q_{rad,abs-bp} + Q_{rad,abs-sur} + Q_{conv,abs-sur} \quad (1)$$

$$m_{bp} C_{p,bp} \left(\frac{dT_{bp}}{dt} \right) = Q_{conv,air-bp} + Q_{rad,abs-bp} - Q_{rad,bp-sur} - Q_{conv,bp-sur} \quad (2)$$

$$m_{air} C_{v,air} \left(\frac{dT_{air,out}}{dt} \right) = Q_{conv,abs-air} - Q_{conv,air-bp} + \dot{m}_{air} C_{p,air} (T_{sur} - T_{air,out}) \quad (3)$$

در معادلات فوق $I_T, T, Q_{rad}, Q_{conv}$ ، C_p, C_v, A, m و α به ترتیب بیان‌کننده انتقال حرارت جابجایی، انتقال حرارت تشعشعی، دما، تابش خورشیدی، گرمای ویژه فشار ثابت، گرمای ویژه در حجم ثابت، مساحت، جرم و ضریب جذب هستند. همچنین زیروندهای abs, bp, air, sur ، Q_{conv} و Q_{rad} به ترتیب اشاره به کلکتور، صفحه پشت، محیط، هوا و خروجی دارند. در ادامه به تفکیک معادلات مربوط به محاسبه ترم‌های انتقال حرارت در معادلات (1) تا (3) ارائه خواهند شد.

برای محاسبه ترم‌های انتقال حرارت جابجایی از قانون سرمایش نیوتن استفاده می‌کنیم. آنچه در این فرمول‌ها حائز اهمیت است، محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی (h_{conv}) می‌باشد. انتقال حرارت جابجایی بین هوای مکیده شده و صفحه جاذب از معادله (4) محاسبه می‌شود.

$$Q_{conv,abs-air} = A_{col} h_{conv,abs-air} (T_{col} - T_{air,out}) \quad (4)$$

مطالعات مربوط به انتقال حرارت جابجایی با مکش از یک صفحه تخت سوراخ‌دار داغ، نسبتاً محدود است، در این تحقیق برای برآورد عدد ناسلت (Nu) از رابطه تجربی گزارش شده توسط کوتسچر [16] استفاده شده است.

$$h_{conv,abs-air} = \frac{(Nu_1 k_{air})}{D}$$

$$Nu_1 = 2.75 \left[\left(\frac{P}{D} \right)^{-1.21} Re_1^{0.43} + 0.011 \beta Re_1 \left(\frac{V_{wind}}{V_{app}} \right)^{0.48} \right]$$

$$Re_1 = \frac{\rho_{air} V_{hole} D}{\mu_{air}} \quad (5)$$

در رابطه (5)، $\mu, k, \beta, P, D, V_{wind}$ و V_{app} به ترتیب بیانگر ضریب هدایت، لزجت، تخلخل، گام، قطر سوراخ، سرعت باد و سرعت مکش هوا می‌باشند. همچنین Re عدد رینولدز است که V_{hole} سرعت هوا درون سوراخ و ρ_{air} چگالی هواست.

انتقال حرارت جابجایی بین هوای درون پلنوم و صفحه پشتی، عدد

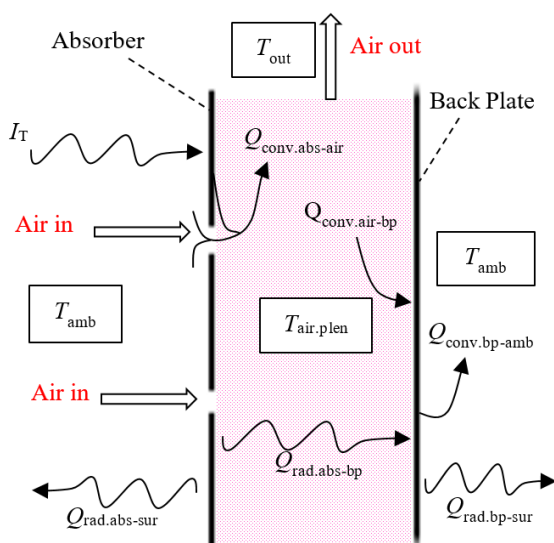


Fig.2 Modes of heat transfer in an Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors[1]

شکل 2 پدیده‌های انتقال حرارت در یک کلکتور مشبک بدون پوشش [1]

3-2- روش حل معادلات حاکم

اعمال معادلات بقاء منجر به سه معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول دارای سه مجهول دمای صفحه جاذب، دمای صفحه پستی و دمای هوای درون کلکتور می شود. این معادلات به هم وابسته بوده و باید به طور هم زمان حل شوند. این معادلات در قالب یک برنامه رایانه ای در نرم افزار متلب پیاده سازی و حل شده اند. علاوه بر این دمای محیط و شدت تابش معلوم در نظر گرفته شده است و متناسب با روز مورد نظر از داده های تجربی استفاده شده است. با توجه به این که داده های تابش و هوای محیط در بازه های 20 دقیقه ای ثبت شده اند و از آنجایی که در حل عددی معادلات برحسب بازه های زمانی کوچک تری حل می شوند از میانینی خطی برای محاسبه این پارامترها استفاده شده است. از نتایج تجربی به عنوان حدس اولیه برای شرایط مرزی مورد نیاز در حل معادلات دیفرانسیل حاکم استفاده شده است. از آنجایی که در واقعیت دمای قسمت های مختلف کلکتور در لحظه شروع اندازه گیری براساس شرایط تابش و دمای محیط پیش از شروع اندازه گیری تعیین می شود؛ استفاده از مقادیر اندازه گیری شده به عنوان شرط مرزی ممکن است یک جهش در دمای صفحه جاذب در زمان های اولیه حل عددی ایجاد نماید. در صورتی که جهشی در دمای صفحه جاذب مشاهده شود؛ شرط اولیه طوری اصلاح می شود که این جهش از بین برود.

4- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج بررسی اثر صفحات جاذب با جنس های استیل (فلزی)، پلی کربنات و پلاستیک فشرده بر کارایی کلکتورهای مشبک ارائه می شوند. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل سازی حرارتی این نتایج در کنار نتایج تجربی (آزمایشگاهی) ارائه شده اند. همان طور که در قسمت ساخت و آزمایش کلکتورها گفته شد به دلیل محدود بودن تجهیزات اندازه گیری، مقایسه بین کلکتورها به صورت دو به دو انجام شده است. در شکل هایی که در ادامه ارائه خواهد شد از عبارات Poly، Plastic و Steel به ترتیب برای کلکتورهای با جنس صفحات جاذب پلی کربنات، پلاستیک و استیل (فلزی) استفاده خواهد شد. علاوه بر این از عبارات Exp. و Num. به ترتیب برای ارائه نتایج تجربی (آزمایشگاهی) و نتایج مدل آنالیز حرارتی (عددی) استفاده خواهد شد. به منظور ارزیابی و مقایسه کلکتورهای مختلف و ارزیابی دقت روش آنالیز حرارتی از تعاریف زیر استفاده شده است.

بیشینه خطای (اختلاف) نسبی:

$$E_{rel,Max}(\%) = \text{Max} \left(\left| \frac{X_i - X_i^{ref}}{X_i^{ref}} \right| \right) \times 100, i = 1, \dots, N \quad (13)$$

متوسط خطای (اختلاف) نسبی:

$$E_{rel,Ave}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - X_i^{ref}| / X_i^{ref}}{N} \times 100 \quad (14)$$

بیشینه اختلاف دما:

$$\Delta T_{Max} = \text{Max}(|T_i - T_i^{ref}|, i = 1, \dots, N) \quad (15)$$

متوسط اختلاف دما:

$$\Delta T_{Ave} = \frac{\sum_{i=1}^N |T_i - T_i^{ref}|}{N} \quad (16)$$

در معادله های بالا، زیر نویس های rel، Ave، Max، ref و خطای نسبی، متوسط، مقدار بیشینه و کمیت مرجع می باشند. همچنین ΔT و E ، X_i ، Max، Ave، rel و خطای نسبی و به ترتیب تابع بیشینه، مقدار متغیر مورد بررسی در نقطه i ، خطای نسبی و اختلاف دما می باشند.

ناسلت و در نتیجه آن ضریب انتقال حرارت جابه جایی بین صفحه تخت (صفحه پستی) و هوا (هوا پلنوم و هوای محیط) از روابط (6-الف) تا (6-ه) محاسبه می شوند [1].

$$Q_{conv.air-bp} = A_{col} h_{conv.air-bp} (T_{out} - T_{bp}) \quad (6-الف)$$

$$h_{conv.air-bp} = \frac{Nu_2 k_{air}}{d_{plen}} \quad (6-ب)$$

$$Nu_2 = 0.664 Re_2^{0.5} Pr_{r,2}^{0.33} \quad (6-ج)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_{air} V_{plen} H}{\mu_{air}} \quad (6-د)$$

$$Pr_{r,2} = \frac{C_{p,air} \mu_{air}}{k_{air}} \quad (6-ه)$$

در معادلات فوق فرض شده است دمای هوای داخل پلنوم برابر دمای هوای خروجی باشد.

انتقال حرارت جابجایی بین هوای محیط و صفحه پستی از روابط (7-الف) تا (7-ه) قابل محاسبه است؛ که در آن ها H و W به ترتیب، ارتفاع و عرض جاذب می باشند و Pr عدد پرانتل است که از رابطه (6-ه) به دست می آید [1]:

$$Q_{conv.bp-sur} = A_{col} h_{conv.bp-sur} (T_{bp} - T_{amb}) \quad (7-الف)$$

$$h_{conv.bp-sur} = \frac{Nu_3 k_{air}}{W} \quad (7-ب)$$

$$Nu_3 = 0.664 (Re_3^{0.5}) Pr_{r,3}^{0.33} \quad (7-ج)$$

$$Re_3 = \frac{\rho_{air} V_{wind} W}{\mu_{air}} \quad (7-د)$$

تلفات حرارت جابه جایی از صفحه جاذب به هوای اطراف کلکتور (هوا محیط) بستگی به سرعت مکش هوا و سرعت باد دارد که از رابطه (8) قابل محاسبه است [6,1].

$$h_c = \begin{cases} 0 & V_{app} \geq 0.02 \\ 0.82 \frac{V_{wind} v_{air} \rho_{air} C_{p,air}}{V_{app} H} & V_{app} < 0.02 \quad V_{wind} \neq 0 \\ 1.31 ((T_{abs} - T_{amb})^{0.33}) & V_{app} < 0.02 \quad V_{wind} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

نرخ انتقال حرارت ناشی از تابش با استفاده از قانون استفان-بولتزمن محاسبه شده است. انتقال حرارت تابشی بین صفحه جاذب و صفحه پستی و همچنین صفحه پستی به محیط از روابط (9) و (10) به دست می آیند؛ که در آن ها ϵ بیانگر ضریب صدور و σ ثابت استفان-بولتزمن است.

$$Q_{rad.abs-bp} = \frac{A_{abs} \sigma_{sb} (T_{abs}^4 - T_{bp}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{abs.in}} + \frac{1}{\epsilon_{bp}} - 1\right)} \quad (9)$$

$$Q_{rad.bp-sur} = A_{abs} \sigma_{sb} \epsilon_{bp} (T_{bp}^4 - T_{sur}^4) \quad (10)$$

تلفات حرارت تابشی از کلکتور به محیط، به آسمان و زمین اتفاق می افتد و به ضریب شکل کلکتور به آسمان (F_{cs}) و ضریب شکل کلکتور به زمین (F_{cg}) و همچنین دمای آسمان و زمین بستگی دارد و از رابطه (11) محاسبه می گردد. در رابطه (11) دمای زمین را برابر با دمای محیط می گیرند [1].

$$Q_{rad.abs-sur} = A_{abs} \sigma_{sb} \epsilon_{abs} (T_{abs}^4 - F_{cs} T_{sky}^4 - F_{cg} T_{gnd}^4) \quad (11)$$

$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5}$ یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی دستگاه های مختلف، بازده آن ها می باشد. بازده یک دستگاه به صورت کسری از انرژی ورودی که به انرژی مفید خروجی تبدیل شده، تعریف می گردد. در این تحقیق، بازده ساعتی با استفاده از معادله زیر محاسبه می شود.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A_{abs} I_T} \quad (12)$$

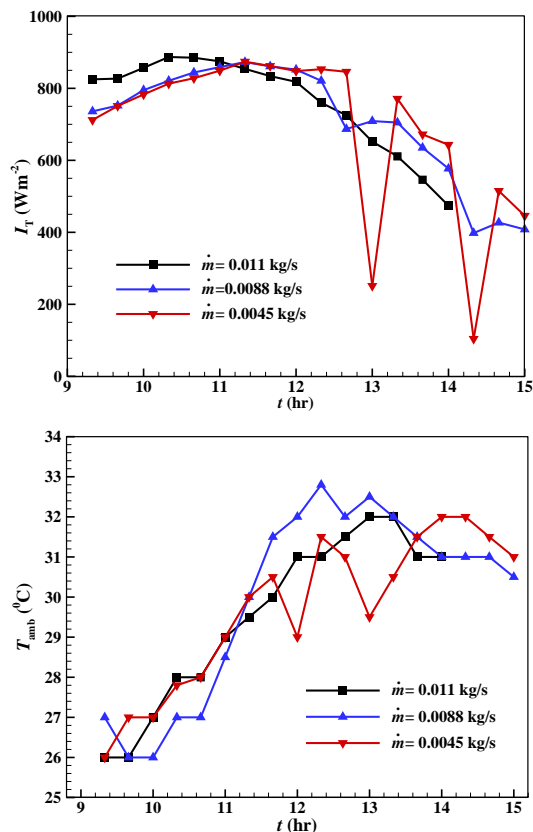


Fig.3 Solar irradiation and ambient temperature on different days of testing metal and polycarbonate collectors

شکل 3 شدت تابش و دمای محیط در سه روز آزمایش کلکتور پلی کربنات و استیل

جدول 2 اختلاف نسبی و اختلاف دمای کلکتور پلی کربنات نسبت به کلکتور فلزی براساس داده‌های تجربی مجموعه آزمایش‌های 1

Table 2 the relative difference and the difference between the temperature of polycarbonate and metal collectors based on experimental data sets of test number 1

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	$\dot{m} [kg/s]$
4.7	2.0	8.8	3.6	T_{abs} 0.011
5.0	3.7	10.7	7.8	T_{Out}
-8.9	3.3	-13.7	5.4	T_{abs} 0.0088
-2.0	0.4	4.9	1.9	T_{Out}
-8.8	3.9	-15.6	6.3	T_{abs} 0.0045
-5.0	0.2	-10.9	2.1	T_{Out}

بیشینه اختلاف نسبی کمتر از 16 درصد) می‌باشد. متوسط اختلاف دمای بین دو کلکتور کمتر از 4 درجه سانتی‌گراد (اختلاف نسبی کمتر از 8 درصد) می‌باشد. بررسی جدول 2 و منحنی‌های دمای هوای خروجی کلکتورهای پلی کربنات و فلزی نشان می‌دهد که با کاهش دمای هوا، اختلاف دمای هوای خروجی دو کلکتور کاهش می‌یابد از نظر فیزیکی این رفتار را این‌گونه می‌توان تفسیر کرد که با کاهش دمای هوا با توجه به این‌که دمای سطح کلکتور پلی کربنات افزایش بیشتری نسبت به کلکتور فلزی دارد و از آنجایی که ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز تقریباً برای دو کلکتور یکسان است (دبی مکش و در نتیجه سرعت مکش یکسان است.) انتقال حرارت انجام شده از قسمت بیرونی صفحه جاذب به نحوی است که با انتقال حرارت انجام شده از جلو و پشت صفحه جاذب فلزی برابری می‌کند و نتیجه آن می‌شود که دمای هوای خروجی هر دو کلکتور تقریباً یکسان شود. بررسی هوای خروجی دو کلکتور نشان می‌دهد که در دبی‌های بررسی شده بیشینه اختلاف بین

1-4- مجموعه آزمایش‌های 1: مقایسه عملکرد دو کلکتور با صفحه‌های جاذب پلی کربنات و استیل (فلزی)

در مجموعه آزمایش‌های 1 مقایسه بین دو کلکتور در سه دبی انجام شده است. در "شکل 3" تغییرات شدت تابش روی سطح کلکتورها و تغییرات دمای محیط در روزهای 13، 16 و 20 شهریورماه که در آن‌ها به ترتیب آزمایش‌ها در دبی‌های 0.011، 0.0088 و 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه انجام شده، نشان داده شده است. به‌منظور ساده‌تر شدن و راحتی مقایسه نتایج در دبی‌های مختلف، در این شکل‌ها و آنچه در ادامه می‌آید، روزهای مختلف براساس دبی مورد آزمایش نه براساس روز سال از هم تفکیک شده‌اند.

همان‌طور که "شکل 3" مشاهده می‌شود در دبی 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه نوساناتی در شدت تابش و دمای محیط دیده می‌شود این نوسانات به دلیل ابری شدن موقت هوا و شرایط محلی آب و هوایی می‌باشد. عدم پیوستگی در این تغییرات به دلیل ثبت داده‌ها در بازه زمانی 20 دقیقه‌ای می‌باشد.

همان‌طور که در قسمت فرضیات بیان شد، در مدل‌سازی حرارتی، توزیع دما در کل صفحه یکنواخت در نظر گرفته شده است. بدین منظور و به منظور مقایسه نتایج، در تمامی شکل‌هایی که در ادامه می‌آیند، نتایج تجربی ارائه شده برای دمای صفحه جاذب، متوسط سه دمای اندازه‌گیری شده بر روی صفحه جاذب می‌باشند (شکل 2).

در "شکل 4" دمای صفحه جاذب دو کلکتور و در "شکل 5" دمای هوای خروجی از کلکتورها باهم و با نتایج آنالیز حرارتی (نتایج عددی) مقایسه شده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند که با نزدیک شدن به ظهر و افزایش شدت تابش خورشید، دمای صفحه جاذب و به طبع آن دمای هوای خروجی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش شدت تابش خورشید در بعدازظهر، تمام دماها کاهش می‌یابند. علاوه به این به دلیل کاهش شدید شدت تابش به دنبال ابری شدن هوا، در دبی 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه نوساناتی در دمای صفحه جاذب و دمای هوای خروجی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وابستگی مستقیم این دماها به شدت تابش می‌باشد. در جدول 2 اختلاف نسبی نتایج کلکتور پلی کربنات نسبت به کلکتور فلزی بر اساس داده‌های تجربی مجموعه آزمایش‌های 1 نشان داده شده است. در این جدول و بقیه این بخش کلکتور استیل به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده و اختلاف‌ها براساس آن محاسبه شده است. مقادیر منفی در این جدول نشان‌دهنده این است که دمای کلکتور پلی کربنات بیشتر از دمای کلکتور فلزی شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با کاهش دبی هوای خروجی، به دلیل کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، دمای صفحه‌های جاذب برای هر دو کلکتور افزایش یافته است. علاوه به این هرچند در دبی 0.011 کیلوگرم بر ثانیه دمای صفحه جاذب کلکتور فلزی بیشتر از صفحه جاذب کلکتور پلی کربنات است. برای دبی 0.0088 و 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه دمای صفحه جاذب کلکتور پلی کربنات بیشتر از کلکتور فلزی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر با کاهش دبی، دمای سطح جاذب پلی کربنات بیشتر از دمای صفحه جاذب می‌شود. این اثر را می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که با کاهش دبی، از آنجایی که انتقال حرارت از پشت صفحه جاذب پلی کربنات به دلیل ضریب رسانایی پایین‌تر، کمتر از کلکتور فلزی است و با توجه به این‌که تابش ورودی و تلفات از قسمت جلو برای دو کلکتور تقریباً یکسان است، دمای صفحه جاذب پلی کربنات بیشتر از دمای صفحه جاذب فلزی می‌شود.

جدول 2 نشان می‌دهد که برای دبی‌های بررسی شده، بیشینه اختلاف دمای بین صفحه جاذب دو کلکتور کمتر از 9 درجه سانتی‌گراد (معادل

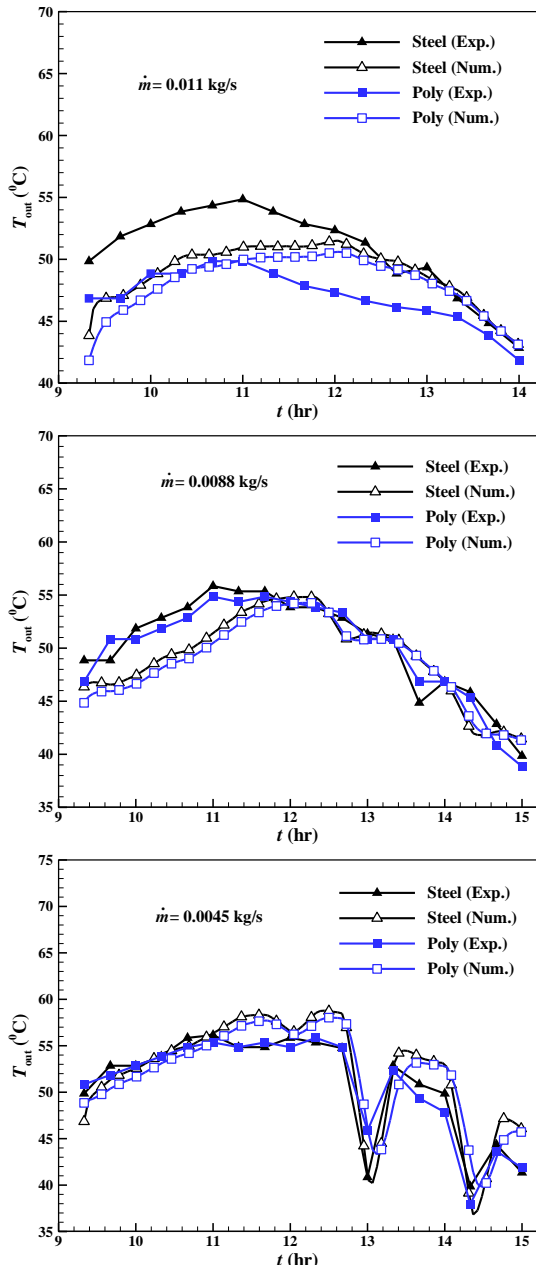


Fig.5 Comparison of outlet air temperatures of the metal and poly-carbonate collectors in different mass flow rates

شکل 5 مقایسه دمای هوای خروجی کلکتور استیل و پلی کربنات در دبی‌های مختلف

بیشترین اختلاف بین دماها برای کلکتور پلی کربنات کمتر از 12 درجه سانتی‌گراد (خطای نسبی کمتر از 30 درصد) و برای کلکتور فلزی کمتر از 10 درجه سانتی‌گراد (خطای نسبی کمتر از 18 درصد) و در تخمین دمای صفحه جاذب می‌باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که مدل آنالیز حرارتی دمای هوای خروجی را با دقت بهتری نسبت به دمای صفحه جاذب تخمین می‌زند. همچنین با کاهش دبی دقت نتایج عددی به‌طور مجانبی کاهش می‌یابد. خطای بیشتر نتایج آنالیز حرارتی در تخمین دمای صفحه جاذب در دبی‌های پایین‌تر به این دلیل است که در این دبی‌ها دمای صفحه جاذب افزایش یافته و توزیع دما بر روی صفحه جاذب غیریکنواخت‌تر می‌شود درحالی‌که مدل آنالیز حرارتی توزیع دما برای همه دبی‌ها یکنواخت فرض شده است. همان‌طور که در بخش روش حل معادلات حاکم ذکر شد داده‌های

دمای هوای خروجی دو کلکتور 5 درجه سانتی‌گراد (اختلاف نسبی کمتر از 11 درصد) می‌باشد.

در جدول‌های 3 و 4 خطای نسبی نتایج آنالیز حرارتی (حل عددی) و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش‌های 1 و به ترتیب برای کلکتور پلی کربنات و فلزی نشان داده شده است. همان‌طور که این جدول‌ها و "شکل‌های 4 و 5" نشان می‌دهد، برای هر دو کلکتور همخوانی خوبی بین داده‌های ثبت شده از اندازه‌گیری‌های تجربی و نتایج آنالیز حرارتی وجود دارد. متوسط اختلاف بین دمای به‌دست آمده از نتایج تجربی و عددی کمتر از 4.5 درجه سانتی‌گراد (معادل اختلاف نسبی کمتر از 8 درصد) برای کلکتور پلی کربنات و کمتر از 6 درجه سانتی‌گراد (معادل اختلاف نسبی کمتر از 11 درصد) برای کلکتور فلزی می‌باشد.

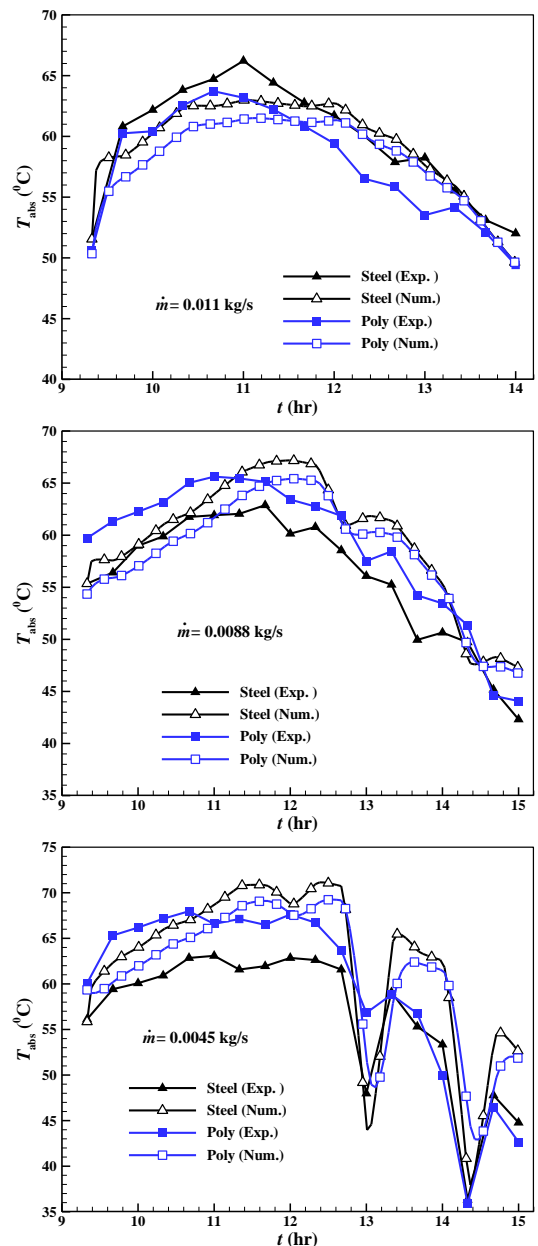


Fig.4 Comparison of absorber temperatures of the steel and poly-carbonate collectors in different mass flow rates

شکل 4 مقایسه دمای صفحات جاذب کلکتور استیل و پلی کربنات در دبی‌های مختلف

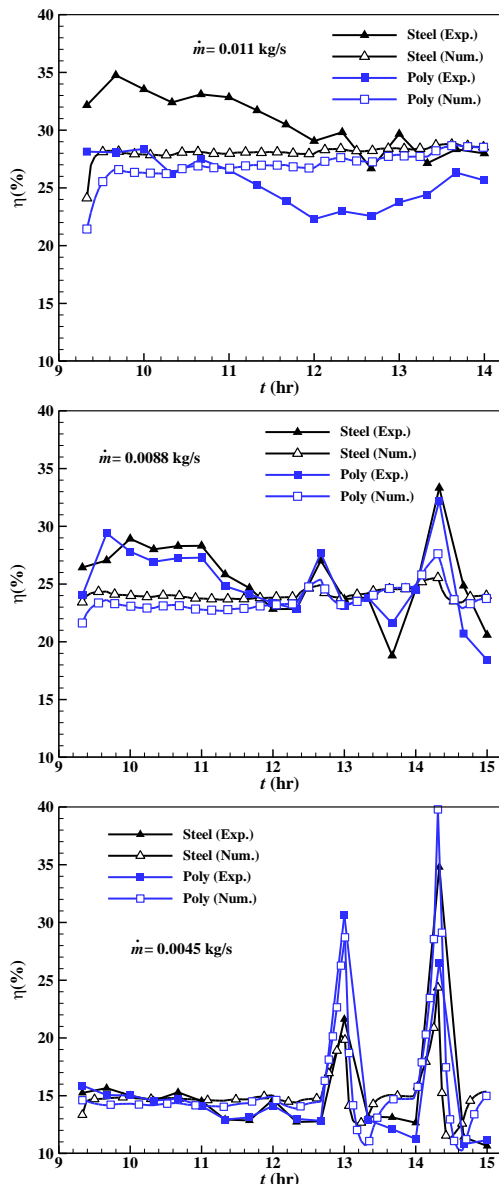


Fig. 6 Comparison of the efficiency of the polycarbonate and metal collectors in different mass flow rates

شکل 6 مقایسه راندمان لحظه‌ای کلکتور استیل و پلی کربنات در دبی‌های مختلف

جاذب از طریق رسانایی به قسمت داخلی صفحه جاذب برسد و در آنجا از طریق جابه‌جایی با هوای داخل پلنوم انتقال حرارت انجام دهد. دلیل افزایش اختلاف بازده دو کلکتور با افزایش دبی این است که با افزایش دبی، اختلاف دمای صفحه جاذب با هوای عبوری افزایش یافته و نقش انتقال حرارت از پشت صفحه جاذب (داخل پلنوم) و رسانایی صفحه جاذب پررنگ‌تر می‌شود. در "شکل 6" تغییرات شدید در نمودار بازده در دبی 0.0045 و به‌طور نسبی در دبی 0.0088 کیلوگرم بر ثانیه به این دلیل است که بازده لحظه‌ای به‌صورت اختلاف دمای هوای خروجی نسبت به دمای هوای ورودی در هر لحظه تقسیم بر شدت تابش در همان لحظه تعریف می‌شود (معادله 12 را ببینید). از آنجایی که به دلیل ذخیره انرژی در صفحه جاذب، تغییرات دمای هوای خروجی (صورت کسر معادله 12) با تأخیر (اختلاف فاز) اتفاق می‌افتد؛ ولی شدت تابش (مخرج کسر معادله 12) با ابری شدن هوا می‌تواند به‌سرعت از یک مقدار زیاد به مقدار نزدیک صفر تغییر کند بازده وقتی که هوا ابری می‌شود به‌شدت افزایش می‌یابد.

تجربی از جمله شدت تابش در بازه‌های 20 دقیقه‌ای ثبت شده‌اند و در آنالیز حرارتی از میانگینی خطی برای محاسبه تابش در فاصله زمانی بین دو تابش ثبت شده استفاده شده است. با توجه به این که در فاصله این بازه‌ها به دلیل ابری شدن هوا، تابش می‌تواند تغییرات قابل توجه داشته باشد و تابش لزوماً به‌صورت خطی بازمان تغییر نمی‌کند، یکی از دلایل اختلاف بین نتایج تجربی و آنالیز حرارتی فرض خطی بودن تغییرات تابش بین بازه‌های زمانی می‌باشد. همان‌طور که در "شکل‌های 4 و 5" و جداول 3 و 4 مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج تجربی و عددی خصوصاً دمای صفحه جاذب برای روزهایی که تابش تغییرات زیادی دارد (دبی‌های 0.0088 و 0.0045) بیشتر می‌باشد.

بازده کلکتورهای استیل (فلزی) و پلی کربنات در دبی‌های مختلف در "شکل 6" ارائه شده است. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که بازده هر دو کلکتور در طول روز تغییرات زیادی نمی‌کند مگر این که تابش ورودی به‌طور ناگهانی تغییر یابد. نتایج عددی به‌دست آمده توسط باداچه و همکاران [10] برای کلکتورهای فلزی نیز چنین رفتاری را نشان می‌دهد. علاوه بر این بازده کلکتور استیل (با ضریب هدایت بالا) در بیشترین دبی براساس نتایج تجربی 8 درصد و براساس نتایج آنالیز حرارتی 3 درصد بیشتر از کلکتور پلی-کربنات (با ضریب هدایت پایین) می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد با کاهش دبی جرمی دمای صفحه جاذب و به دنبال آن دمای هوای خروجی افزایش می‌یابد؛ اما افزایش دمای صفحه جاذب بیشتر از افزایش دمای هوای خروجی است. به عبارتی اختلاف دمای صفحه جاذب و هوای خروجی افزایش یافته و در نتیجه‌ی آن با کاهش دبی، بازده کلکتورها به دلایل زیر کاهش می‌یابد:

- 1- بخشی از انرژی انتقال یافته به هوای ورودی، به دلیل سرعت مکش پایین به محیط بازگردانده شده و تلف می‌شود.
 - 2- به دلیل افزایش بیشتر دمای صفحه جاذب نسبت به دمای هوای محیط تلفات حرارتی تابشی و جابجایی به محیط افزایش می‌یابد.
- دلیل اختلاف بازده دو کلکتور، رسانایی بالاتر صفحه‌های استیل نسبت به صفحه‌های پلی کربنات است که باعث می‌شود حرارت جذب‌شده توسط صفحه

جدول 3 خطای نسبی و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) کلکتور پلی-

کربنات نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش‌های 1

Table 3 the relative error and the difference between thermal analysis (numerical) and experimental data sets of polycarbonate collector in test number 1

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	\dot{m} [kg/s]
-3.7	1.9	6.7	3.2	T_{abs}
-5.0	1.9	-10.7	4.0	T_{Out}
-9.5	3.3	-14.5	5.5	T_{abs}
-4.9	2.1	-9.7	4.1	T_{Out}
11.5	4.1	29.2	7.9	T_{abs}
5.0	2.2	13.0	4.5	T_{Out}

جدول 4 خطای نسبی و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) کلکتور فلزی

نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش‌های 1

Table 4 the relative error and the difference between thermal analysis (numerical) and experimental data sets of metal collector in test number 1

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	\dot{m} [kg/s]
-3.3	1.4	-4.9	2.3	T_{abs}
-6.0	2.4	-12.0	4.6	T_{Out}
8.4	3.5	16.8	6.4	T_{abs}
-4.4	2.1	9.2	4.2	T_{Out}
9.2	5.8	17.6	10.4	T_{abs}
4.7	2.0	11.4	3.9	T_{Out}

2-4- مجموعه آزمایش های 2: مقایسه عملکرد دو کلکتور با جنس

صفحه های جاذب پلی کربنات و پلاستیک فشرده

در مجموعه آزمایش های 2 مقایسه بین دو کلکتور پلاستیک فشرده و پلی کربنات انجام شده است. همانند مقایسه بین دو کلکتور فلزی و پلی کربنات، مقایسه بین این دو کلکتور نیز در سه دبی انجام شده است. در "شکل 7" شدت تابش خورشید بر روی صفحه جاذب و تغییرات دمای محیط در روزهای 4، 6 و 10 شهریورماه که در آن ها به ترتیب آزمایش ها در دبی های 0.011، 0.0088 و 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه انجام شده، نشان داده شده است.

در "شکل 8" دمای صفحه جاذب دو کلکتور و در "شکل 9" دمای هوای خروجی از کلکتورها با هم و با نتایج آنالیز حرارتی (نتایج عددی) مقایسه شده است. بررسی این شکل ها نشان می دهد که با کاهش دبی هوای خروجی، دمای صفحه های جاذب برای هر دو کلکتور افزایش یافته است. برای هر سه دبی بررسی شده، دمای صفحه جاذب کلکتور پلاستیک فشرده بیشتر از صفحه جاذب کلکتور پلی کربنات است. با این وجود با کاهش دبی، اختلاف بین دمای صفحه جاذب دو کلکتور کاهش می یابد.

در جدول 5 اختلاف نسبی نتایج کلکتور پلاستیک فشرده نسبت به کلکتور پلی کربنات براساس داده های تجربی مجموعه آزمایش های 2 نشان داده شده است. در این جدول و آنچه در ادامه می آید کلکتور پلی کربنات به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و اختلافها براساس آن محاسبه شده است. در این جدول ها مقادیر منفی نشان دهنده این است که دمای کلکتور پلی کربنات بیشتر از دمای کلکتور پلاستیک فشرده شده است.

جدول 5 نشان می دهد که برای دبی های بررسی شده، بیشینه اختلاف دمای بین صفحه جاذب دو کلکتور کمتر از 10 درجه سانتی گراد (معادل بیشینه اختلاف نسبی کمتر از 19 درصد) بوده که در دبی 0.011 کیلوگرم بر ثانیه اتفاق افتاده است. متوسط اختلاف دمای بین دو کلکتور کمتر از 8 درجه سانتی گراد (اختلاف نسبی متوسط کمتر از 16 درصد) می باشد که مربوط به دبی 0.011 کیلوگرم بر ثانیه می باشد. با کاهش دبی به 0.0088 نتایج دمای صفحه جاذب دو کلکتور به هم بسیار نزدیک می شوند. با کاهش بیشتر دبی، اختلاف دمای صفحه جاذب دو کلکتور دوباره افزایش می یابد.

بررسی جدول 5 و منحنی های دمای هوای خروجی کلکتورهای پلی کربنات و پلاستیک فشرده نشان می دهد که اختلاف بین دمای هوای خروجی از دو کلکتور نسبت به اختلاف دمای صفحه جاذب دو کلکتور کمتر است. علاوه براین با کاهش دبی هوا، اختلاف دمای هوای خروجی دو کلکتور کاهش می یابد و دمای هوای خروجی هر دو کلکتور تقریباً یکسان می شود. بررسی هوای خروجی دو کلکتور نشان می دهد که در دبی های بررسی شده بیشینه اختلاف بین دمای هوای خروجی دو کلکتور کمتر از 5 درجه سانتی گراد (اختلاف نسبی بیشینه کمتر از 10 درصد) می باشد. با توجه به این که متوسط اختلاف نسبی دمای خروجی دو کلکتور کمتر از 6 درصد است می توان گفت که اختلاف قابل ملاحظه ای بین دمای خروجی دو کلکتور خصوصاً در دبی های پایین وجود ندارد.

در جدول های 6 و 7 خطای نسبی نتایج آنالیز حرارتی (حل عددی) و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) نسبت به نتایج تجربی به ترتیب برای کلکتور پلی کربنات و پلاستیک فشرده نشان داده شده اند. همان طور که این جدول ها و "شکل های 8 تا 9" نشان می دهند، برای هر دو کلکتور همخوانی نسبتاً خوبی بین داده های ثبت شده از اندازه گیری های تجربی و نتایج آنالیز حرارتی وجود دارد. متوسط اختلاف بین دمای به دست

آمده از نتایج تجربی و عددی کمتر از 6 درجه سانتی گراد (معادل متوسط اختلاف نسبی حدود 10 درصد) برای کلکتور پلی کربنات و کمتر از 8 درجه سانتی گراد (معادل متوسط اختلاف نسبی حدود 13 درصد) برای کلکتور پلاستیک فشرده می باشد. بیشترین اختلاف بین دماها برای کلکتور پلی کربنات کمتر از 10 درجه سانتی گراد (بیشینه خطای نسبی کمتر از 19 درصد) و برای کلکتور پلاستیک فشرده کمتر از 12 درجه سانتی گراد (خطای نسبی کمتر از 21 درصد) و در تخمین دمای صفحه جاذب می باشد. علاوه براین مشاهده می شود که آنالیز حرارتی دمای هوای خروجی را با دقت بهتری نسبت به دمای صفحه جاذب تخمین می زند.

بازده کلکتورهای استیل (فلزی) و پلی کربنات در دبی های مختلف در "شکل 10" ارائه داده شده است. بررسی این شکل ها نشان می دهد که تغییرات بازده هر دو کلکتور در طول روز نسبتاً کم است و به جزء برای دبی

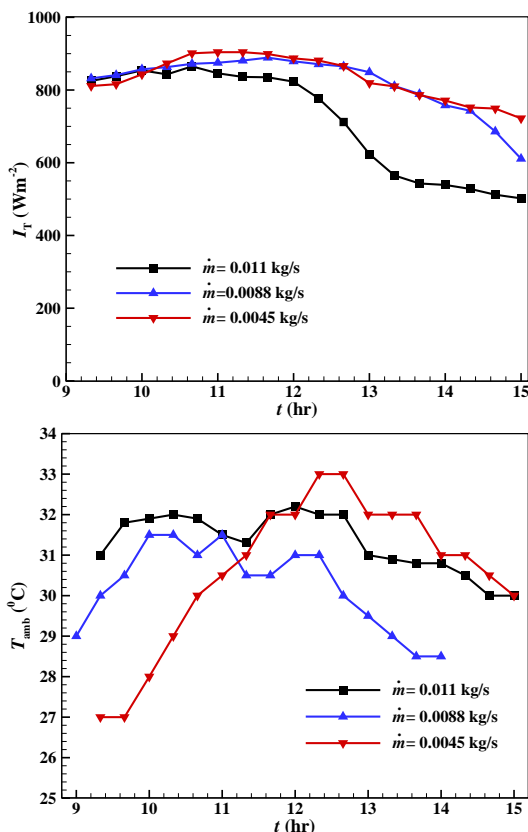


Fig. 7 Solar irradiation and ambient temperature on different days of testing metal and polycarbonate collectors

شکل 7 شدت تابش و دمای محیط در روزهای مختلف آزمایش کلکتور پلی کربنات و پلاستیک فشرده

جدول 5 متوسط و بیشینه اختلاف نسبی و اختلاف دمای کلکتور پلاستیک فشرده

نسبت به کلکتور پلی کربنات براساس داده های تجربی مجموعه آزمایش های 2

Table 5 the average and maximum relative difference and temperature difference between the polycarbonate and plastic collectors based on experimental data sets of test number 2

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	$\dot{m} [kg/s]$
9.4	7.9	18.6	15.3	T_{abs}
4.7	2.7	9.6	5.9	T_{Out}
1.2	0.5	2.1	0.8	T_{abs}
4.1	1.4	7.8	2.7	T_{Out}
4.3	3.2	6.3	4.9	T_{abs}
0.6	0.3	1.1	0.5	T_{Out}

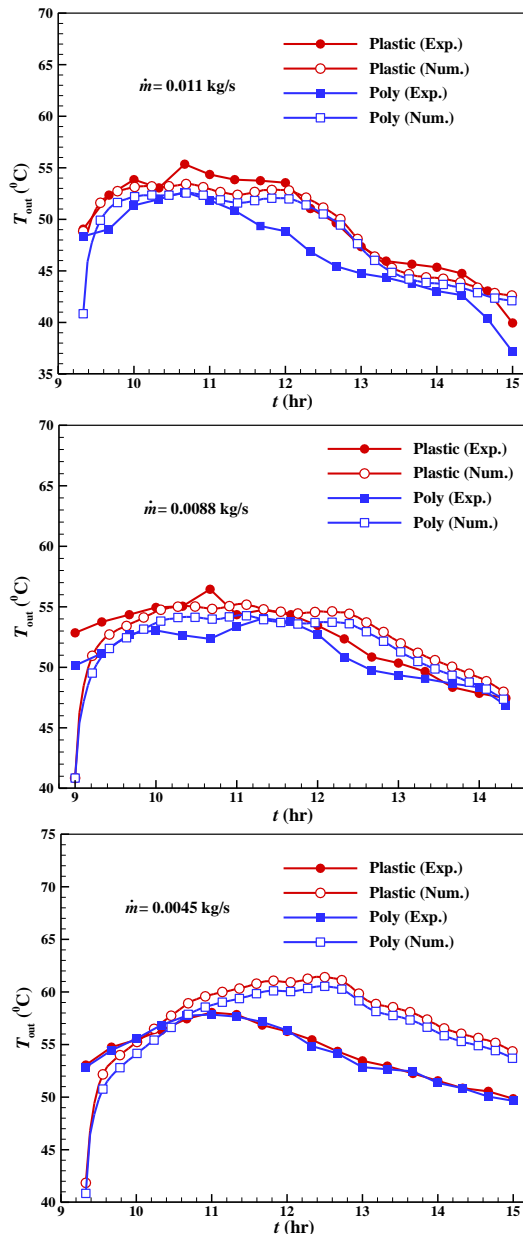


Fig. 9 Comparison of outlet air temperatures of the plastic and polycarbonate collectors in different mass flow rates

شکل 9 مقایسه دمای هوای خروجی از کلکتور پلاستیک فشرده و پلی کربنات در دبی های مختلف

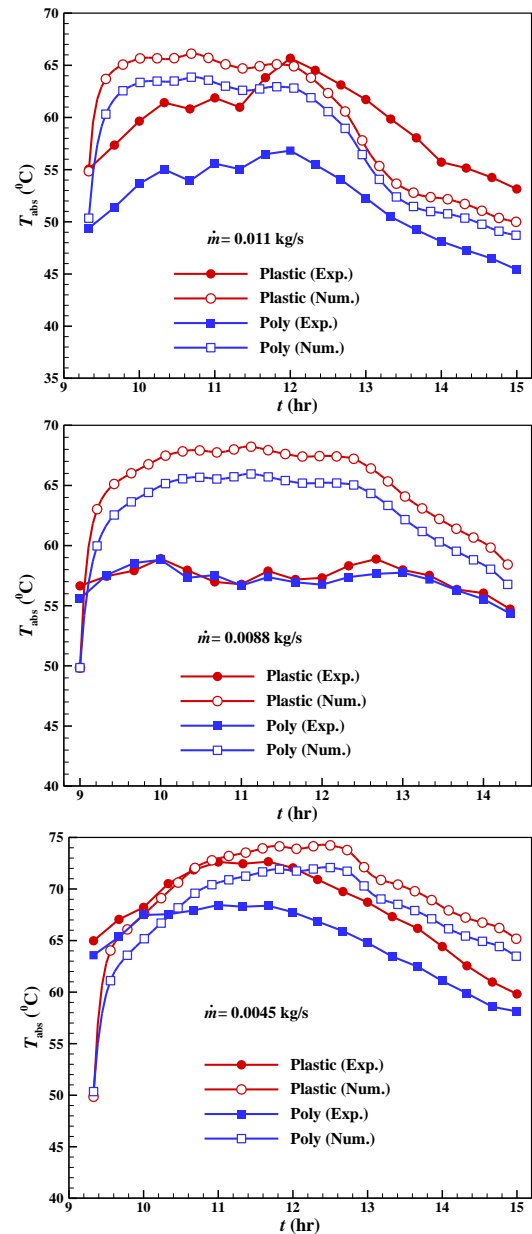


Fig. 8 Comparison of absorber temperatures of the plastic and polycarbonate collectors at different mass flow rates

شکل 8 مقایسه دمای صفحات جاذب کلکتور پلاستیک فشرده و پلی کربنات در دبی های مختلف

جدول 7 خطای نسبی و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) کلکتور پلاستیک فشرده نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش های 2

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	\dot{m} [kg/s]
-5.7	3.4	-9.6	5.8	0.011
2.7	1.0	6.7	2.0	
11.4	7.5	20.1	13.1	0.0088
-6.0	1.4	-11.4	2.7	
5.5	2.4	9.0	3.7	0.0045
6.9	3.7	12.7	6.9	

کلکتور پلی کربنات می باشد. نتایج مربوط به تغییرات دما و بازده، نشان می دهند که دمای هوای خروجی و در نتیجه بازده کلکتور پلاستیک فشرده

جدول 6 متوسط و بیشینه خطای نسبی و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) کلکتور پلی کربنات نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش های 2

ΔT_{Max}	ΔT_{Ave}	$E_{rel,Max}$	$E_{rel,Ave}$	\dot{m} [kg/s]
9.9	5.2	18.4	9.7	0.011
5.0	2.0	13.4	4.4	
9.2	5.8	16.2	10.1	0.0088
-3.3	1.2	-6.6	2.3	
6.1	3.7	10.4	5.9	0.0045
6.2	3.2	11.5	6.1	

0.011 کیلوگرم بر ثانیه بازده دو کلکتور تقریباً یکسان است. بازده کلکتور پلاستیک فشرده در بیشترین دبی براساس نتایج تجربی 8 درصد بیشتر از

پوشش با صفحه‌های جاذب غیرفلزی شامل صفحه پلی‌کربنات و پلاستیک فشرده و کلکتور با صفحه جاذب استیل مقایسه و رفتار آن‌ها در سه دبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور درک بهتر پدیده‌های انتقال حرارت و ارزیابی رفتار کلکتورها، یک مدل آنالیز حرارتی، بر پایه قانون اول ترمودینامیک، از رفتار این کلکتورها با در نظر گرفتن تمامی روش‌های انتقال حرارت (شامل رسانایی، جابه‌جایی و تابش) توسعه داده شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج جدید به‌دست‌آمده از تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی نمود.

1- در مجموع همخوانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به‌دست آمده از مدل آنالیز حرارتی وجود دارد. با این وجود مدل ارائه شده، دمای هوای خروجی از کلکتورها را نسبت به دمای صفحه جاذب همواره با دقت بهتری تخمین می‌زند. برای اکثر شرایط خطای نسبی

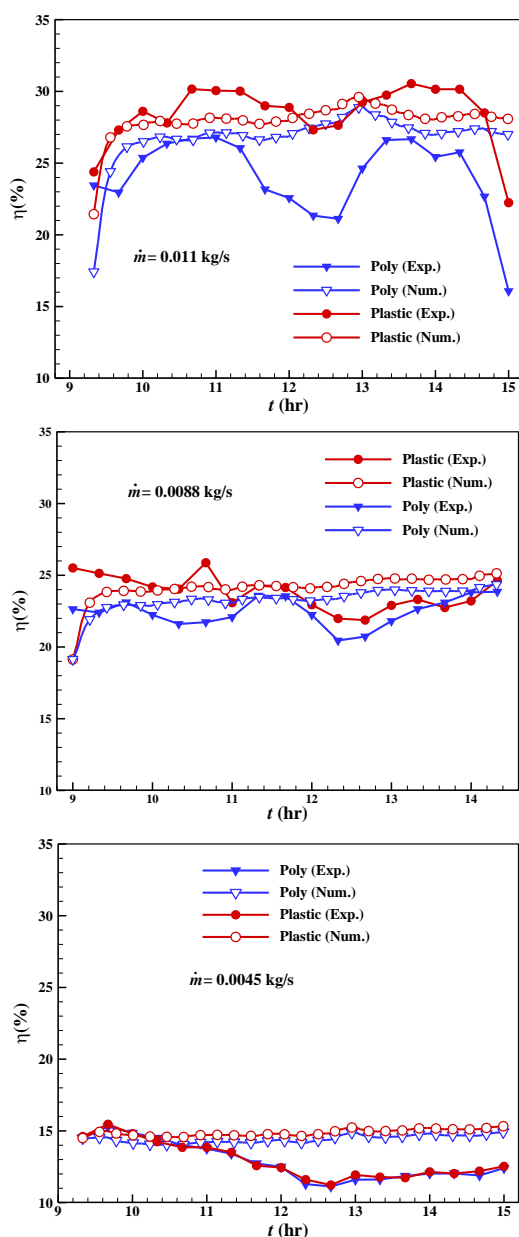


Fig. 10 Comparison of the efficiency of the polycarbonate and plastic collectors at different mass flow rates

شکل 10 مقایسه راندمان لحظه‌ای کلکتور پلاستیک فشرده و پلی‌کربنات در دبی‌های مختلف

در تشعشع‌های مختلف بیشتر از دمای خروجی کلکتور پلی‌کربنات است. بنابراین از آنجایی که عملکرد کلکتور پلاستیک فشرده بهتر از پلی‌کربنات است، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد کلکتور پلاستیک فشرده به عملکرد کلکتور استیل نزدیک‌تر است؛ اما از آنجایی که در آزمایش مربوط به مقایسه دو کلکتور پلاستیک و پلی‌کربنات، با افزایش دمای سطح کلکتور، تنش حرارتی در صفحه پلاستیک به وجود آمده و موجب تغییر شکل کلکتور شد، امکان مقایسه دو کلکتور استیل و پلاستیک فشرده به‌طور هم‌زمان وجود نداشته است. لازم به ذکر است در هنگام خرید به محدوده دمای کاری صفحات جاذب توجه شده بود و از آنجایی که دمای مجاز صفحه جاذب پلاستیک فشرده برای این صفحه 90 درجه سانتی‌گراد بود به نظر می‌رسید که صفحه مناسبی باشد. بعد از خرید و انجام آزمایش‌ها همان‌طور که در مقاله اشاره شد صفحه جاذب تغییر شکل داد که به دلیل تنش‌های حرارتی می‌باشد؛ بنابراین با توجه به وجود انواع مختلف صفحات پلاستیک فشرده در بازار توصیه می‌شود برای کاربرد در کلکتورهای مشبک، صفحات با دمای کاری حدود 120 درجه سانتی‌گراد و بالاتر مدنظر قرار گیرند.

با مقایسه دو کلکتور در دبی‌های مختلف، مشاهده می‌شود که با کاهش دبی مکش، دمای صفحه جاذب هر دو کلکتور افزایش یافته است اما دمای هوای خروجی دو کلکتور تغییر چندانی نداشته و یا تغییرات آن کم بوده است که همین امر موجب افزایش اختلاف دمای صفحه جاذب و هوای خروجی و در نتیجه کاهش راندمان کلکتورها شده است. همچنین در دبی‌های پایین اختلاف دمای هوای خروجی دو کلکتور کم شده و همان‌طور که در منحنی‌های مربوط به بازده مشخص است؛ راندمان دو کلکتور نیز به هم نزدیک شده‌اند که این امر نشانگر بهبود بازده کلکتور پلی‌کربنات در دبی‌های پایین می‌باشد.

3-4- بررسی اثر دبی مکش

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که برای دبی‌های مورد بررسی، راندمان هر سه کلکتور نسبتاً پایین است و به‌ندرت به 35٪ می‌رسد. دلیل این امر سرعت مکش پایین است که باعث می‌شود اتلافات جابه‌جایی از صفحه جاذب به محیط اطراف افزایش یابد و نتوان از تمامی ظرفیت کلکتور استفاده نمود.

با توجه به این که به دلیل محدودیت امکانات آزمایشگاهی، ایجاد دبی بیشتر از 0.011 (kg/s) امکان‌پذیر نبود و از آنجایی که نتایج آنالیز حرارتی از دقت مطلوبی برخوردار بودند، در این قسمت اثر افزایش دبی بر کارایی کلکتور با استفاده از مدل آنالیز حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور فرض شده است که دمای محیط و شدت تابش در طول روز همانند روز آزمایش با دبی 0.011 باشند. در "شکل 11" اثر افزایش دبی بر بازده روزانه کلکتورهای استیل، پلی‌کربنات و پلاستیک فشرده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی، بازده هر سه کلکتور به‌صورت مجانبی افزایش یافته و برای دبی 0.1 kg/s به حدود 60 درصد می‌رسد. با بررسی این شکل نشان می‌دهد که اولاً از نظر بیشترین بازده کلکتورها به‌صورت کلکتور فلزی، پلاستیک فشرده و پلی‌کربنات دسته‌بندی می‌شوند. دوماً با افزایش دبی، اختلاف بین بازده کلکتورها افزایش می‌یابد. سوماً بازده کلکتور پلاستیک فشرده بسیار نزدیک به کلکتور فلزی است و می‌توان از این کلکتورها به‌عنوان جایگزین کلکتورهای فلزی استفاده نمود.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر برای اولین بار کارایی کلکتورهای خورشیدی مشبک بدون

این وجود باید در انتخاب پلاستیک فشرده دقت نمود و ماده‌ای را انتخاب نمود که قابلیت تحمل و پایداری در دماهای بالا را داشته باشد.

6- بررسی فوق نشان می‌دهد برای کاربردهایی که اختلاف دمای زیاد و دبی کم مورد نیاز است، مثل خشک کردن محصولات کشاورزی، استفاده از کلکتورهای غیرفلزی (پلی کربنات و پلاستیک فشرده) به دلیل صرفه‌جویی زیاد در هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری، گزینه مناسبی می‌باشند.

6- مراجع

- [1] M. A. Leon, S. Kumar, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 1, pp. 62-75, 2007.
- [2] S. Arulanandam, K. T. Hollands, E. Brundrett, A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions, *Solar Energy*, Vol. 67, No. 1, pp. 93-100, 1999.
- [3] B. Fleck, R. Meier, M. Matović, A field study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector, *Solar Energy*, Vol. 73, No. 3, pp. 209-216, 2002.
- [4] K. M. Gawlik, C. F. Kutscher, A numerical and experimental investigation of low-conductivity unglazed, transpired solar air heaters, *ASME International Solar Energy Conference*, Reno, Nevada, USA, June 15-20, 2002, pp. 47-55.
- [5] S. Motahar, An analysis of unglazed transpired solar collectors based on exergetic performance criteria, *International Journal of Thermodynamics*, Vol. 13, No. 4, pp. 153-160, 2010.
- [6] M. Gholampour, M. Ameri, Design considerations of unglazed transpired collectors: energetic and exergetic studies, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 136, No. 3, pp. 031004_1-10, 2014.
- [7] S. Tajdaran, F. Bonatesta, R. Ogden, C. Kendrick, CFD modeling of transpired solar collectors and characterisation of multi-scale airflow and heat transfer mechanisms, *Solar Energy*, Vol. 131, pp. 149-164, 2016.
- [8] R. Vaziri, M. Ilkan, F. Egelioglu, Experimental performance of perforated glazed solar air heaters and unglazed transpired solar air heater, *Solar Energy*, Vol. 119, pp. 251-260, 2015.
- [9] M. R. Collins, H. Abulhair, An evaluation of heat transfer and effectiveness for unglazed transpired solar air heaters, *Solar Energy*, Vol. 99, pp. 231-245, 2014.
- [10] M. Badache, D. R. Rousse, S. Hallé, G. Quesada, Experimental and numerical simulation of a two-dimensional unglazed transpired solar air collector, *Solar Energy*, Vol. 93, pp. 209-219, 2013.
- [11] A. Shukla, D. N. Nkwetta, Y. Cho, V. Stevenson, P. Jones, A state of art review on the performance of transpired solar collector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 6, pp. 3975-3985, 2012.
- [12] J. Hollick, Solar cogeneration panels, *Renewable Energy*, Vol. 15, No. 1-4, pp. 195-200, 1998.
- [13] A. Naveed, E. Kang, E. Lee, Effect of unglazed transpired collector on the performance of a polycrystalline silicon photovoltaic module, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 349-353, 2006.
- [14] A. K. Athienitis, J. Bambara, B. O'Neill, J. Faille, A prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 1, pp. 139-153, 2011.
- [15] D. N. Summers, Thermal simulation and economic assessment of unglazed transpired collector systems, M.S. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1995.
- [16] C. Kutscher, Heat exchange effectiveness and pressure drop for air flow through perforated plates with and without crosswind, *Journal of Heat Transfer*, *Transactions ASME*, Vol. 116, No. 2, pp. 391-399, 1994.

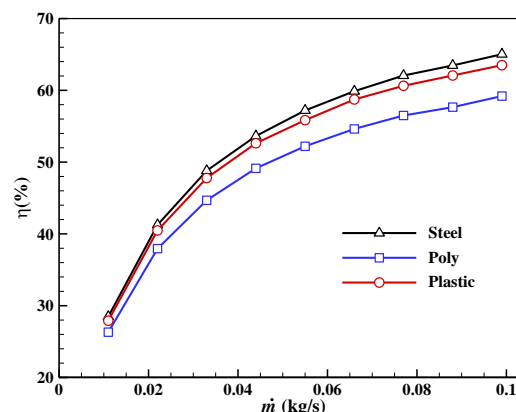


Fig. 11 Effect of mass flow of air on efficiency of metal, polycarbonate and plastic collectors

شکل 11 اثر دبی بر بازده کلکتورهای فلزی، پلی کربنات و پلاستیک فشرده

متوسط در تخمین دمای هوای خروجی از کلکتور کمتر از 5 درصد است که با توجه به صفر بعدی بودن این مدل دقت بسیار خوبی محسوب می‌شود. متوسط خطای نسبی در تخمین دمای صفحه جاذب برای اکثر شرایط کاری کمتر از 10 درصد است.

2- بررسی نتایج آزمایش‌های کلکتورهای ساخته شده نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف بین کلکتورها در بالاترین دبی یعنی 0.011 کیلوگرم بر ثانیه اتفاق می‌افتد. در این دبی متوسط اختلاف نسبی بین دمای صفحه جاذب و دمای هوای خروجی کلکتور استیل و دماهای مربوطه در کلکتور پلی کربنات کمتر از 8 درصد می‌باشد. این اختلاف نسبی دماها برای کلکتور پلی کربنات و پلاستیک فشرده کمتر از 16 درصد می‌باشد. در بقیه دبی‌ها همخوانی خوبی بین دماهای کلکتورها وجود دارد.

3- هرچند با افزایش دبی دمای هوای خروجی از کلکتورها کاهش می‌یابد با این وجود با افزایش دبی بازده هر سه کلکتور، به دلیل کاهش تلفات جابجایی و تابشی از صفحه جاذب به محیط، افزایش می‌یابد.

4- هرچند سه کلکتور کارایی و بازده خوبی داشتند و خصوصاً در دبی‌های پایین اختلاف زیادی بین آن‌ها وجود نداشت. با این وجود کلکتور استیل (فلزی) بیشترین و کلکتور پلی کربنات کمترین کارایی را داشتند. کارایی و بازده کلکتور پلاستیک فشرده بسیار نزدیک کلکتور استیل بود.

5- بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از کلکتور پلاستیک فشرده به جای کلکتور استیل (فلزی) گزینه مناسبی است. با