



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

فاطمه افزلی<sup>1</sup>، حسین امیری<sup>2\*</sup>، وحید نخعی<sup>1</sup>، مهران عامری<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی های 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

### 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

### چکیده

کلکتورهای هوایی مشبک بدون پوشش خورشیدی تکنولوژی های نسبتاً نوینی هستند که می توان از آن ها به منظور گرمایش ساختمان ها و فضاهای بزرگ، خشک کردن محصولات کشاورزی و صنعتی استفاده نمود. در این کلکتورها هوا به وسیله صفحات جاذب مشبک (سوراخ دار) معمولاً فلزی گرم می شود. هزینه خرید و آماده سازی صفحات جاذب سهم قابل توجهی از هزینه های این نوع از کلکتورها را به خود اختصاص می دهد. در تحقیق حاضر به صورت آزمایشگاهی و تئوری به بررسی و ارزیابی کارایی صفحات جاذب غیرفلزی موجود در بازار ایران به عنوان جایگزین صفحات جاذب استیل (فلزی) پرداخته شده است. بدین منظور سه کلکتور با صفحات جاذب استیل (فلزی)، پلی کربنات و پلاستیک - فشرده طراحی، ساخته و در سه دبی هوا مورد آزمایش قرار گرفته اند. علاوه بر این یک مدل آنالیز حرارتی بر پایه قانون اول ترمودینامیک از رفتار این کلکتورها با در نظر گرفتن تمامی روش های 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 به طوری که 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 دبی های کم وجود ندارد. با این وجود برای شرایط بررسی شده کلکتور استیل بهترین کارایی و کلکتور پلی کربنات پایین ترین کارایی را داشت. کارایی و بازده کلکتور پلاستیک فشرده بسیار نزدیک کلکتور استیل بود و با توجه به مزایای کلکتورهای غیرفلزی استفاده از آن به جای کلکتورهای فلزی پیشنهاد می شود.

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

Fatemeh Afzali<sup>1</sup>, Hossein Amiri<sup>1\*</sup>, Vahid Nakhaei<sup>1</sup>, Mehran Ameri<sup>2</sup>

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:

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)

## 1- مقدمه

در دهه های اخیر، افزایش مصرف سوخت های فسیلی که موجب افزایش صدور گازهای گلخانه ای و دیگر آلودگی های زیست محیطی می شود از یک سو و مشکل رو به اتمام بودن منابع سوخت های فسیلی در آینده نزدیک از سوی دیگر، موجب شده در جهان رویکرد جدیدی نسبت به استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر پیدا شود. یکی از اصلی ترین منابع انرژی تجدیدپذیر انرژی خورشید است که منبع مستقیم تقریباً تمام انرژی های تجدیدپذیر می باشد. انرژی موجود در پرتوهای خورشید را می توان به روش های مختلفی استحصال کرد. یکی از تکنولوژی های مربوط در این زمینه، کلکتورهای خورشیدی می باشند. انواع کلکتورهای خورشیدی به سه دسته اصلی تقسیم می شوند که شامل کلکتورهای تخت، کلکتورهای تحت خلأ و کلکتورهای متمرکز کننده می باشند. از میان انواع کلکتور، کلکتورهای تخت ساده ترین و پرکاربردترین ها هستند.

کلکتورهای مشبک بدون پوشش (نفوذی) خورشیدی<sup>1</sup> که در اوایل دهه 1990 میلادی معرفی شدند [1]، نوعی هواگرم کن خورشیدی می باشند که استفاده از آن ها یکی از مؤثرترین روش های کاهش بار تهویه مطبوع در ساختمان هاست. علاوه بر این، از این کلکتورها می توان برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده نمود. جزء اصلی این کلکتورها، صفحه جاذب مشبک معمولاً به رنگ تیره (سیاه) است که می تواند از جنس های مختلفی ساخته شود و منافذی به صورت شیار یا سوراخ بر روی آن ایجاد تعبیه می شود. 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 سوراخ ها گرمای صفحه را جذب کرده و توسط دمنده در ساختمان پخش می شود. به دلیل مکش هوا از روی صفحه جاذب، لایه مرزی بر روی این صفحه از بین رفته و تلفات حرارتی از این صفحه به طور قابل توجهی کاهش می یابد. در نتیجه، این کلکتورها برعکس کلکتورهای هوا گرم کن معمول، به پوشش شفاف نیاز ندارند. به همین دلیل، هزینه آن ها کمتر و دارای بالاترین راندمان برای گرمایش هوا می باشند [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 شبیه سازی دینامیک سیالات بر روی یک صفحه با سوراخ هایی با الگوی مربعی در حالت بدون وزش باد رابطه ای را برای محاسبه ضریب مؤثر مبدل حرارتی به دست آوردند و رابطه ای تجربی را برای محاسبه عدد ناسلت ارائه نمودند. فلک و همکاران [3] به صورت 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 به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که رسانایی مواد اثر کمی بر کارایی حرارتی این دستگاه ها دارد. لیون و کومار [1] با ارائه یک مدل ریاضی برای محاسبه حرارتی این دستگاه ها، 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 روزنه ها، شدت تابش و سرعت مکش، تأثیر معناداری در کارایی این کلکتورها دارند. غلامپور و عامری [6] به بررسی ملاحظات طراحی در کلکتورهای خورشیدی مشبک

<sup>1</sup> Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors

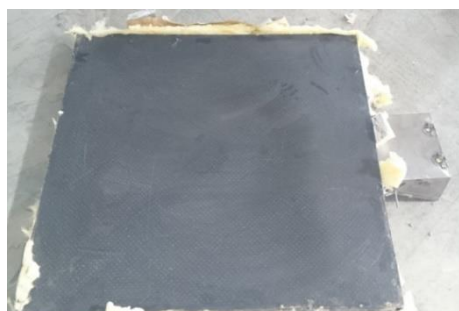
بدون پوشش بر پایه مطالعات انرژی و انرژی پرداختند و پارامترهای مؤثر در کارایی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که تحلیل انرژی در طراحی این کلکتورها دارای اهمیت فراوانی است. تاجدران و همکاران [7] با استفاده از یک روش عددی، پارامترهای سرعت و جهت باد، جریان غیریکنواخت و مغشوش، شدت تابش و موقعیت خورشید و نرخ مکش جریان را بررسی کرده و نشان دادند که فاکتورهای مثل زاویه باد، اثرات قابل توجهی بر عملکرد حرارتی این دستگاه ها دارد و اثر نسبت مکش در سرعت های باد پایین تر افزایش می یابد. همچنین نشان دادند، همان طور که انتظار می رود، با تغییر موقعیت خورشید در طول روز (ساعت روز)، دمای عملکرد کلکتور متفاوت خواهد بود. وزیری و همکاران [8] به صورت تجربی، عملکرد حرارتی هواگرم کن های خورشیدی مشبک با پوشش بارنگ های متفاوت داخلی کلکتور و یک کلکتور مشبک بدون پوشش بارنگ تیره مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که راندمان حرارتی کلکتور خورشیدی با پوشش حتی در روشن ترین 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 دوزنقه ای پرداختند. باداچه و همکاران [10] به صورت عددی به شبیه سازی دوبعدی کلکتورهای هوایی مشبک خورشیدی بدون شیشه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که در دبی های 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 می یابد. مروری بر مطالعات انجام شده بر روی کلکتورهای مشبک توسط شوکلا و همکاران [11] انجام شده است. آن ها در این تحقیق انواع مختلف این نوع از کلکتورها، اصول کارکرد، روش های مدل سازی و مطالعات انجام شده بر روی این کلکتورها را مرور کرده اند. همچنین یک سری بررسی های تئوری و آزمایشگاهی بر روی کلکتورهای مشبک بدون پوشش ترکیبی با پنل های 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 پنل های فتوولتائیک نصب شده بر روی دستگاه های کلکتور مشبک عملکرد بهتری نسبت به دستگاه های معمول فتوولتائیک دارند. نوید و همکاران [13] عملکرد پنل های فتوولتائیک را در دو حالت معمول و نصب شده بر روی کلکتور مشبک را مقایسه کردند. آتینایتس و همکاران [14] دستگاه های کلکتور مشبک با و بدون پنل فتوولتائیک را به صورت 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 باقی مانده که باید برطرف شوند. از موضوعاتی که در مورد این کلکتورها مطرح است هزینه نسبتاً زیاد صفحات جاذب و سوراخ کاری آن ها و مشکلات خوردگی صفحات و سنگین بودن مجموعه کلکتورهای فلزی می باشد. استفاده از صفحات جاذبی که به فراوانی در بازار موجود باشند و هزینه کمی داشته و سبک بوده و در برابر خوردگی مقاوم باشند، می تواند فراگیر شدن این نوع کلکتورها کمک کند. در همین راستا در تحقیق حاضر برای اولین بار کارایی کلکتورهایی با صفحات جاذب پلاستیک فشرده و پلی کربنات که به فراوانی در بازار ایران در دسترس هستند با یکدیگر و با کلکتور با جنس صفحه جاذب استیل (فلزی) مقایسه شده اند. 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 پیش بینی رفتار این کلکتورها با در نظر گرفته

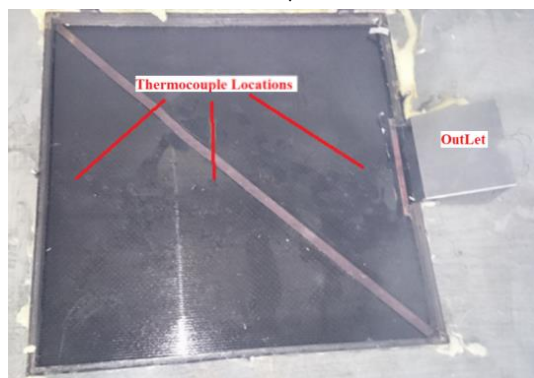
صفحه جاذب در سه نقطه و به وسیله سه ترموکوپل گونه-تی<sup>2</sup> متصل به دیتالاگر پروا (دقت دستگاه  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) اندازه گیری شده است. در "شکل 1" مکان های نصب ترموکوپل ها، نشان داده شده است. برای محاسبه دبی جرمی هوا نیاز به سرعت هوا می باشد که با استفاده از دستگاه سرعت سنج تستو مدل 435 (با 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 نگه دارنده (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"<sup>1</sup> 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 (ضدانعکاسی) 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  $12 \times 12$  سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. این دو فن قادرند هوا را با دبی های مختلف 0.0088، 0.011، 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

<sup>2</sup> T-type<sup>1</sup> plenum

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

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

در معادلات فوق  $Q_{rad}$ ,  $T$ ,  $C_p$ ,  $C_v$ ,  $A$ ,  $m$  و  $\alpha$  به ترتیب بیان کننده 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  $abs$ ,  $bp$ ,  $sur$ ,  $air$  و  $out$ ، 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 جابه جایی از قانون سرمایش نیوتن استفاده می کنیم. آنچه در این فرمول ها حائز اهمیت است، محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه جایی ( $h_{conv}$ ) می باشد. انتقال حرارت جابجایی بین هوای مکیده شده و صفحه جاذب از معادله (4) محاسبه می شود.

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

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

$$h_{conv, abs \sim air} = \frac{(Nu_1 k_{air})}{\mu_{air}} \quad Nu_1 = 2.75 \left[ \left( \frac{P}{D} \right)^{-1.21} Re_1^{0.43} + 0.011 \beta Re_1 \left( \frac{V_{wind}}{V_{app}} \right)^{0.48} \right] \quad Re_1 = \frac{\rho_{air} V_{hole} D}{\mu_{air}} \quad (5)$$

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

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

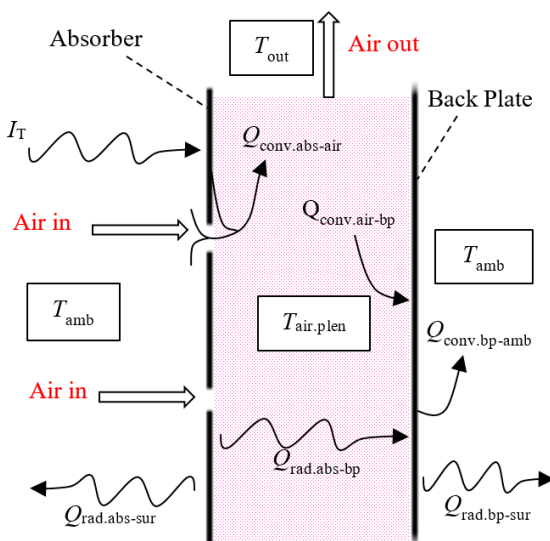


Fig.2 Modes of heat transfer in an Unglazed Transpired Solar Air Heater Collectors[1]

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

جدول 1 مشخصات ترموفیزیکی صفحات جاذب و ابعاد کلکتورها

Table1 Thermo-physical properties of absorber plates and dimensions of the collectors

| 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 سوراخ ها (mm)            |
| 12    | گام سوراخ ها (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 دستگاه های اندازه گیری، در هر روز فقط داده های دو کلکتور قابل ثبت بوده اند. بنابراین مقایسه بین کلکتورها دوبه دو انجام شده است.

### 3- آنالیز حرارتی

از آنجایی که حل معادلات حاکم بر رفتار سیال در کلی ترین حالت آن بسیار پیچیده و برای مسائل واقعی عملاً غیرممکن می باشد، معمولاً با توجه به دقت و جزییات مورد نیاز از حرکت سیال، با استفاده از فرضیاتی این معادلات ساده تر شده و حل می شوند. در این تحقیق از آنجایی که هدف از مدل سازی 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 چشم پوشی است.
- 3- جاذب به صورت جسم خاکستری و دیفیوز در نظر گرفته می شود.
- 4- از تلفات حرارتی لبه پلنوم صرف نظر شده است.
- 5- هوا به صورت گاز ایدئال در نظر گرفته شده است.
- 6- مدل سازی به صورت صفر بعدی انجام شده و از تغییرات مکانی دمای صفحه جاذب، صفحه پشتی و داخل هوای پلنوم صرف نظر شده است.

### 3-1- معادلات حاکم

مکانیسم های 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 می یابد. قسمتی از انرژی جذب شده توسط صفحات جاذب به وسیله مکانیسم جابجایی و در طی مسیر حرکت هوای مکیده شده (جریان یافته) بر رو و پشت صفحات جاذب و در داخل سوراخ ها، به هوا منتقل می شود. قسمت دیگری از انرژی جذب شده، توسط انتقال حرارت تشعشعی به صفحه پشتی منتقل می شود و مابقی، از طریق فرآیند تشعشع و جابجایی به محیط اطراف منتقل و تلف می گردد. در "شکل 2" روش های 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 به صورت زیر درمی آید:

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

### 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 همزمان 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 موردنظر 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 موردنیاز 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 Plastic، Poly 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:

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

متوسط خطای (اختلاف) نسبی:

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

بیشینه اختلاف دما:

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

متوسط اختلاف دما:

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

در معادله های بالا، زیرنویس های rel، Ave، Max و ref خطای نسبی، متوسط، مقدار بیشینه و کمیت مرجع می باشند. همچنین  $\Delta T$  و  $E$ ،  $X_i$ ، Max 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].

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

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

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

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

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

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

انتقال حرارت جابه جایی 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]:

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

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

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

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

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  $\varepsilon$  بیانگر ضریب صدور و  $\sigma$  ثابت استفان-بولتزمن است.

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

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

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].

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

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.

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

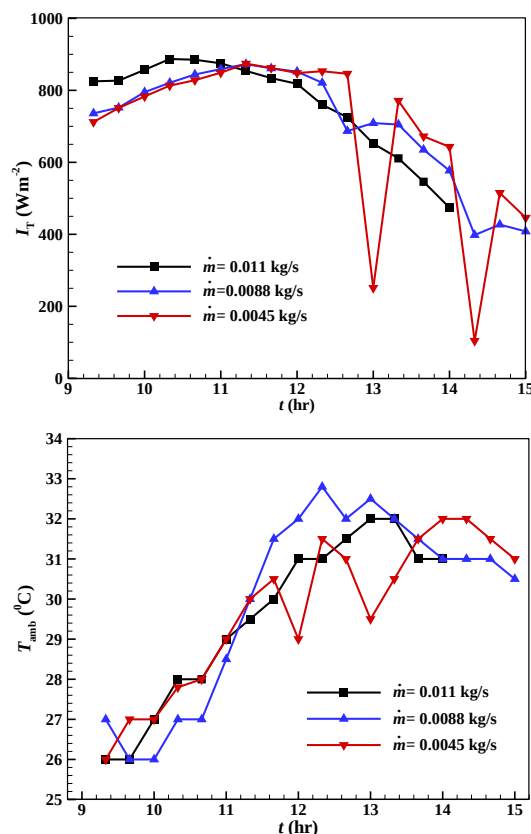


Fig.3 Solar irradiation and ambient temperature on different days of testing metal and polycarbonate collectors

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 داده های تجربی مجموعه آزمایش های 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

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

بیشینه اختلاف نسبی کمتر از 16 درصد) می باشد. متوسط اختلاف دمای بین دو کلکتور کمتر از 4 درجه سانتی گراد (اختلاف نسبی کمتر از 8 درصد) می باشد. بررسی جدول 2 و منحنی های دمای هوای خروجی کلکتورهای پلی کربنات و فلزی نشان می دهد که با کاهش دبی هوا، اختلاف دمای هوای خروجی دو کلکتور کاهش می یابد از نظر فیزیکی این رفتار را این گونه می توان تفسیر کرد که با کاهش دبی هوا با توجه به این که دمای سطح کلکتور پلی کربنات افزایش بیشتری نسبت به کلکتور فلزی دارد و از آن جایی 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 می کند و نتیجه آن می شود که دمای هوای خروجی هر دو کلکتور تقریباً یکسان شود. بررسی هوای خروجی دو کلکتور نشان می دهد که در دبی های بررسی شده بیشینه اختلاف بین

#### 1-4- مجموعه آزمایش های 1: مقایسه عملکرد دو کلکتور با صفحه های جاذب پلی کربنات و استیل (فلزی)

در مجموعه آزمایش های 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 آزمایش ها در دبی های 0.011، 0.0088 و 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه انجام شده، نشان داده شده است. به منظور ساده تر شدن و راحتی مقایسه نتایج در دبی های مختلف، در این شکل ها و آنچه در ادامه می آید، روزهای مختلف براساس دبی مورد آزمایش نه براساس روز سال از هم تفکیک شده اند. همان طور که "شکل 3" مشاهده می شود در دبی 0.0045 کیلوگرم بر ثانیه نوساناتی در شدت تابش و دمای محیط دیده می شود این نوسانات به دلیل ابری شدن موقت هوا و شرایط محلی آب و هوایی می باشد. عدم پیوستگی در این تغییرات به دلیل ثبت داده ها در بازه زمانی 20 دقیقه ای می باشد.

همان طور که در قسمت فرضیات بیان شد، در مدل سازی حرارتی، توزیع دما در کل صفحه یکنواخت در نظر گرفته شده است. بدین منظور و به منظور مقایسه نتایج، در تمامی شکل هایی که در ادامه می آیند، نتایج تجربی ارائه شده برای دمای صفحه جاذب، متوسط سه دمای اندازه گیری شده بر روی صفحه جاذب می باشند (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. همان طور که این شکل ها نشان می دهند که با نزدیک شدن به ظهر و افزایش شدت تابش خورشید، دمای صفحه جاذب و به طبع آن دمای هوای خروجی افزایش می یابد. همچنین با کاهش شدت تابش خورشید در بعدازظهر، تمام دماها کاهش می یابند. 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 می شود که نشان دهنده وابستگی مستقیم این دماها به شدت تابش می باشد. در جدول 2 اختلاف نسبی نتایج کلکتور پلی کربنات نسبت به کلکتور فلزی بر اساس داده های تجربی مجموعه آزمایش های 1 نشان داده شده است. در این جدول و بقیه این بخش کلکتور استیل به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و اختلاف ها براساس آن محاسبه شده است. مقادیر منفی در این جدول نشان دهنده این است که دمای کلکتور پلی کربنات بیشتر از دمای کلکتور فلزی شده است.

بررسی نتایج نشان می دهد که با کاهش دبی هوای خروجی، به دلیل کاهش ضریب انتقال حرارت جابه جایی، دمای صفحه های جاذب برای هر دو کلکتور افزایش یافته است. علاوه به این هر چند 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 می شود. به عبارت دیگر با کاهش دبی، دمای سطح جاذب پلی کربنات بیشتر از دمای صفحه جاذب می شود. این اثر را می توان این گونه تحلیل کرد که با کاهش دبی، از آن جایی که انتقال حرارت از پشت صفحه جاذب پلی کربنات به دلیل ضریب رسانایی پایین تر، کمتر از کلکتور فلزی است و با توجه به این که تابش ورودی و تلفات از قسمت جلو برای دو کلکتور تقریباً یکسان است، دمای صفحه جاذب پلی کربنات بیشتر از دمای صفحه جاذب فلزی می شود.

جدول 2 نشان می دهد که برای دبی های بررسی شده، بیشینه اختلاف دمای بین صفحه جاذب دو کلکتور کمتر از 9 درجه سانتی گراد (معادل

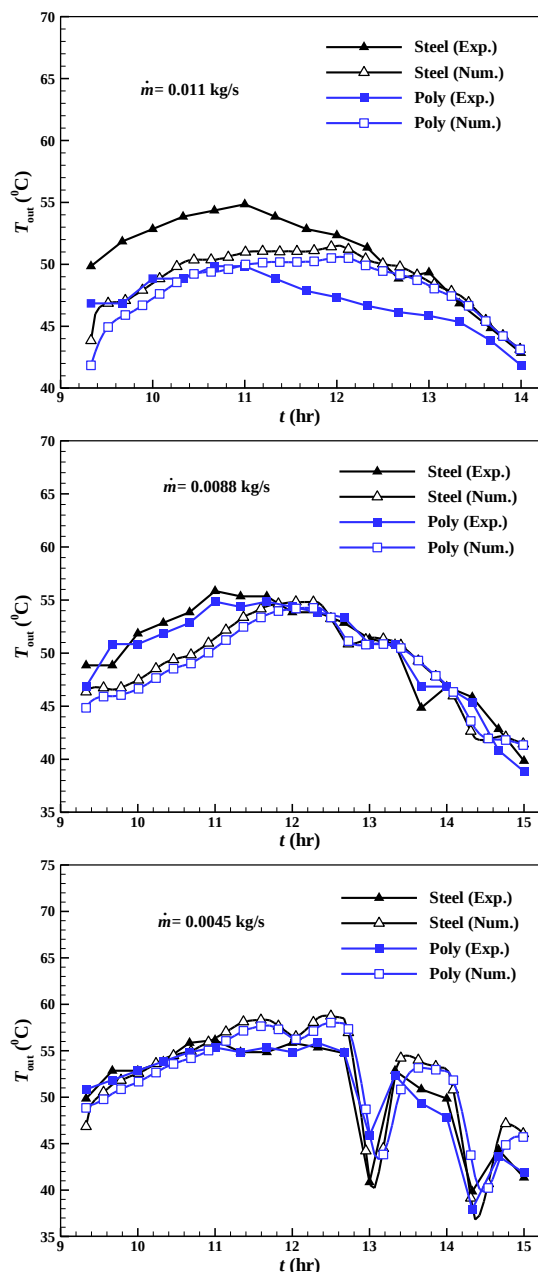


Fig.5 Comparison of outlet air temperatures of the metal and poly-carbonate collectors in different mass flow rates

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 سانتی گراد (خطای نسبی کمتر از 30 درصد) و برای کلکتور فلزی کمتر از 10 درجه سانتی گراد (خطای نسبی کمتر از 18 درصد) و در تخمین دمای صفحه جاذب می باشد. علاوه بر این مشاهده می شود که مدل آنالیز حرارتی دمای هوای خروجی را با دقت بهتری نسبت به دمای صفحه جاذب تخمین می زند. همچنین با کاهش دبی دقت نتایج عددی به طور مجانبی کاهش می یابد. خطای بیشتر نتایج آنالیز حرارتی در تخمین دمای صفحه جاذب در دبی های پایین تر به این دلیل است که در این دبی ها دمای صفحه جاذب افزایش یافته و توزیع دما بر روی صفحه جاذب غیر یکنواخت تر می شود در حالی که مدل آنالیز حرارتی توزیع دما برای همه دبی ها یکنواخت فرض شده است. همان طور که در بخش روش حل معادلات حاکم ذکر شد داده های

دمای هوای خروجی دو کلکتور 5 درجه سانتی گراد (اختلاف نسبی کمتر از 11 درصد) می باشد.

در جدول های 3 و 4 خطای نسبی نتایج آنالیز حرارتی (حل عددی) و اختلاف دمای نتایج آنالیز حرارتی (عددی) نسبت به نتایج تجربی در مجموعه آزمایش های 1 و به ترتیب برای کلکتور پلی کربنات و فلزی نشان داده شده است. همان طور که این جدول ها و "شکل های 4 و 5" نشان می دهد، برای هر دو کلکتور همخوانی 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 4.5 درجه سانتی گراد (معادل اختلاف نسبی کمتر از 8 درصد) برای کلکتور پلی کربنات و کمتر از 6 درجه سانتی گراد (معادل اختلاف نسبی کمتر از 11 درصد) برای کلکتور فلزی می باشد.

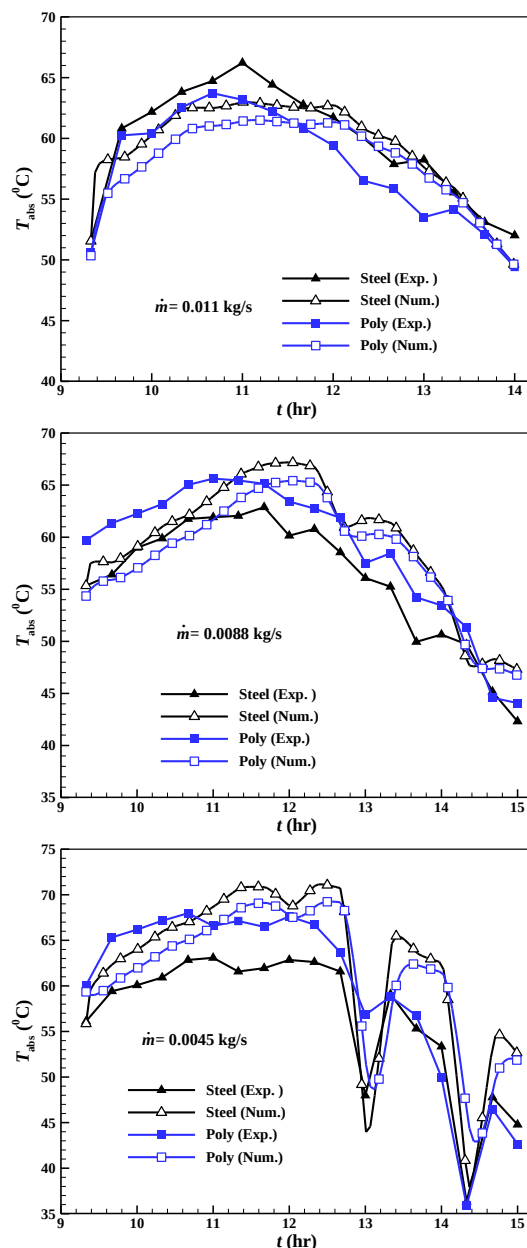


Fig.4 Comparison of absorber temperatures of the steel and poly-carbonate collectors in different mass flow rates

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

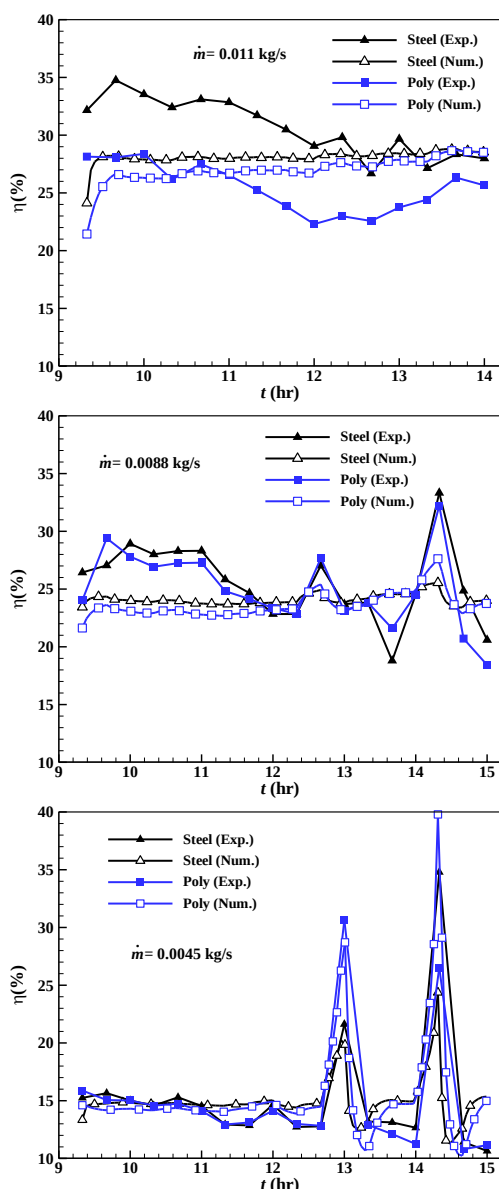


Fig. 6 Comparison of the efficiency of the polycarbonate and metal collectors in different mass flow rates

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 داده 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 اداچه 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 نتیجه‌ای 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

| $\Delta T_{Max}$ | $\Delta T_{Ave}$ | $E_{rel,Max}$ | $E_{rel,Ave}$ | $\dot{m} [kg/s]$ |
|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| -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

| $\Delta T_{Max}$ | $\Delta T_{Ave}$ | $E_{rel,Max}$ | $E_{rel,Ave}$ | $\dot{m} [kg/s]$ |
|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| -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           | $T_{Out}$        |

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

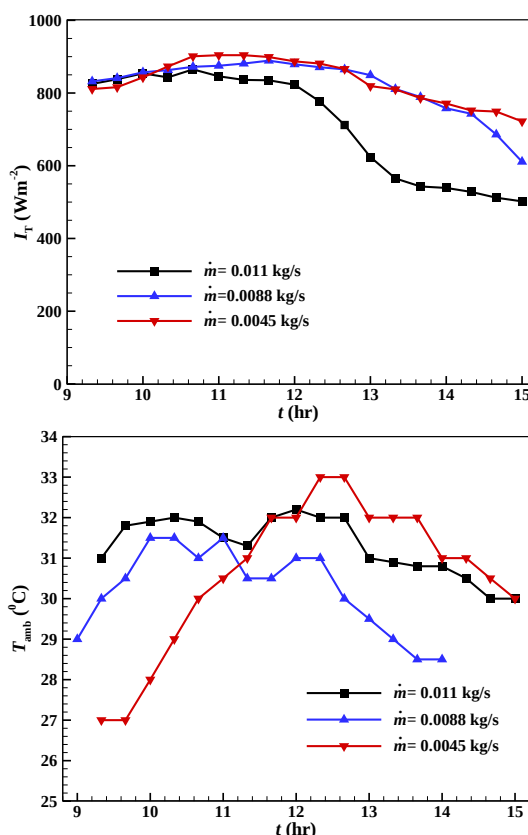


Fig. 7 Solar irradiation and ambient temperature on different days of testing metal and polycarbonate collectors

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

| $\Delta T_{Max}$ | $\Delta T_{Ave}$ | $E_{rel,Max}$ | $E_{rel,Ave}$ | $\dot{m} [kg/s]$ |
|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| 9.4              | 7.9              | 18.6          | 15.3          | 0.011            |
| 4.7              | 2.7              | 9.6           | 5.9           |                  |
| 1.2              | 0.5              | 2.1           | 0.8           |                  |
| 4.1              | 1.4              | 7.8           | 2.7           | 0.0088           |
| 4.3              | 3.2              | 6.3           | 4.9           |                  |
| 0.6              | 0.3              | 1.1           | 0.5           |                  |

## 4-2- 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 باهم 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 اختلاف ها 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

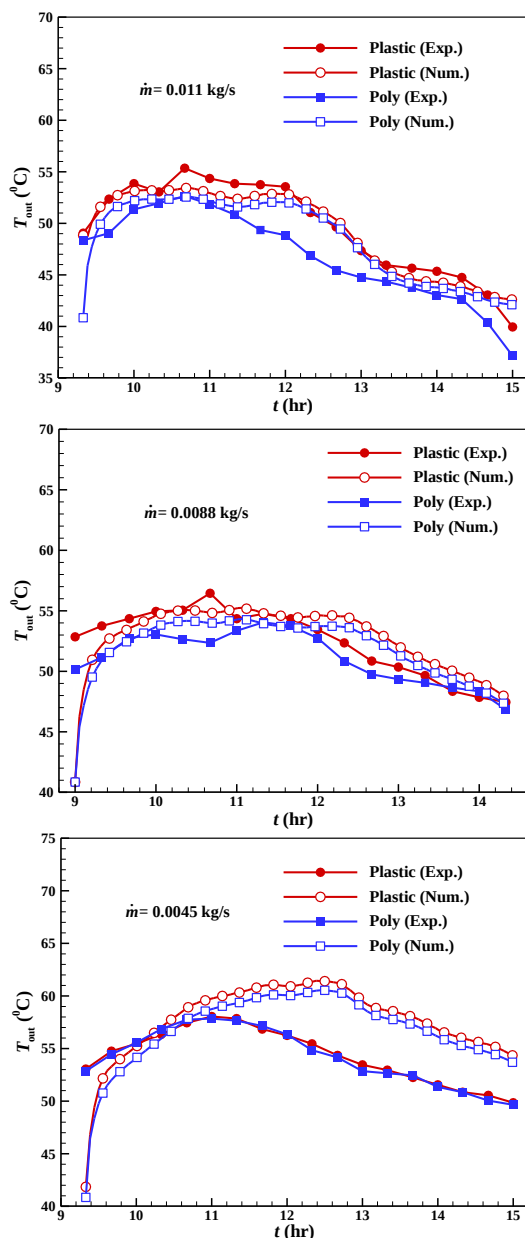


Fig. 9 Comparison of outlet air temperatures of the plastic and polycarbonate collectors in different mass flow rates

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

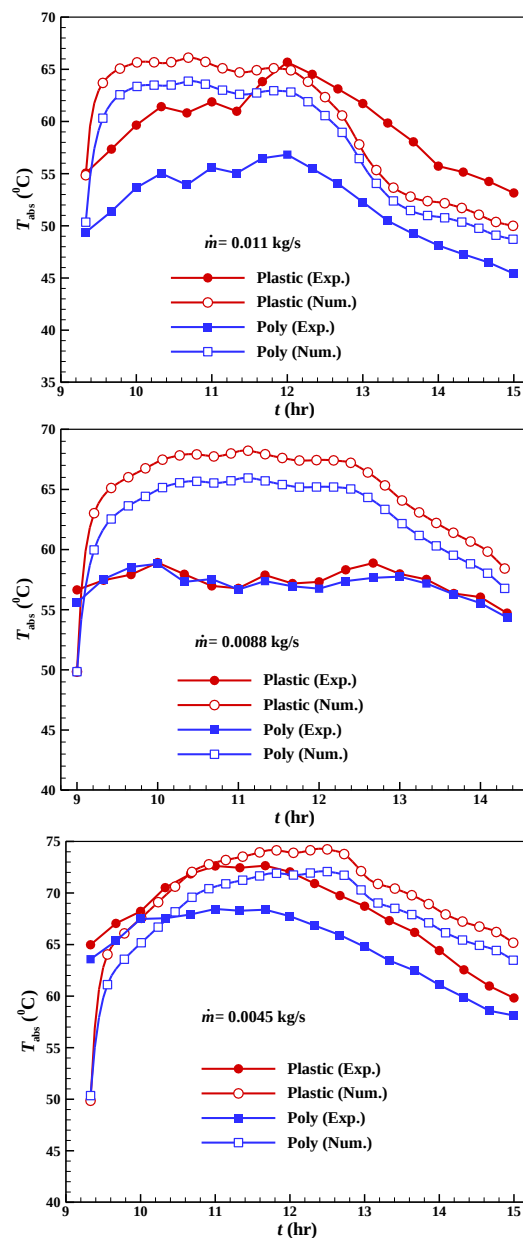


Fig. 8 Comparison of absorber temperatures of the plastic and polycarbonate collectors at different mass flow rates

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

Table 7 the relative error and the temperature difference between thermal analysis (numerical) and experimental data sets of plastic collector in test number 2

| $\Delta T_{Max}$ | $\Delta T_{Ave}$ | $E_{rel,Max}$ | $E_{rel,Ave}$ | $\dot{m}[\text{kg/s}]$ |
|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------------|
| -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          |                        |
| -6.0             | 1.4              | -11.4         | 2.7           | 0.0088                 |
| 5.5              | 2.4              | 9.0           | 3.7           |                        |
| 6.9              | 3.7              | 12.7          | 6.9           | 0.0045                 |

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

Table 6 the average and maximum relative difference and temperature difference between thermal analysis (numerical) and experimental data sets of polycarbonate collector in test number 2

| $\Delta T_{Max}$ | $\Delta T_{Ave}$ | $E_{rel,Max}$ | $E_{rel,Ave}$ | $\dot{m}[\text{kg/s}]$ |
|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------------|
| 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 صفحه های جاذب غیرفلزی شامل صفحه پلی کربنات و پلاستیک فشرده و کلکتور با صفحه جاذب استیل مقایسه و رفتار آن ها در سه دبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور درک بهتر پدیده های انتقال حرارت و ارزیابی رفتار کلکتورها، یک مدل آنالیز حرارتی، بر پایه قانون اول ترمودینامیک، از رفتار این کلکتورها با در نظر گرفتن تمامی روش های انتقال حرارت (شامل رسانایی، جابه جایی و تابش) توسعه داده شد و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج جدید به دست آمده از تحقیق را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود.

1- در مجموع همخوانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست 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 می زند. برای اکثر شرایط خطای نسبی

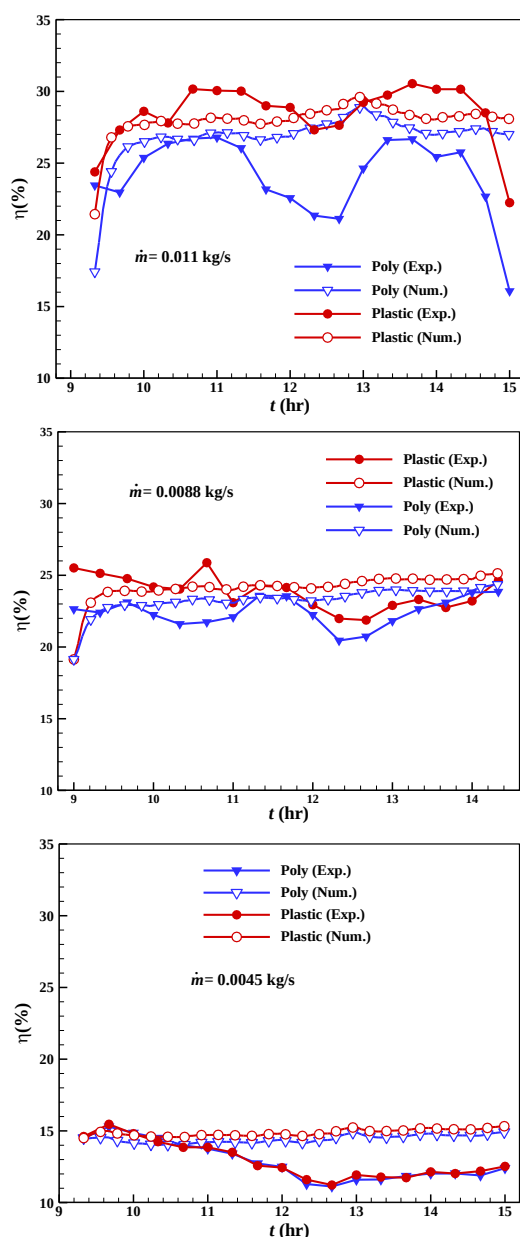


Fig. 10 Comparison of the efficiency of the polycarbonate and plastic collectors at different mass flow rates

شکل 10 مقایسه راندمان لحظه ای کلکتور پلاستیک فشرده و پلی کربنات در دبی های مختلف

در تشعشع های مختلف بیشتر از دمای خروجی کلکتور پلی کربنات است. بنابراین از آن جایی که عملکرد کلکتور پلاستیک فشرده بهتر از پلی کربنات است، می توان نتیجه گرفت که عملکرد کلکتور پلاستیک فشرده به عملکرد کلکتور استیل نزدیک تر است؛ اما از آن جایی که در آزمایش مربوط به مقایسه دو کلکتور پلاستیک و پلی کربنات، 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 به طور هم زمان وجود نداشته است. لازم به ذکر است در هنگام خرید به محدوده دمای کاری صفحات جاذب توجه شده بود و از آن جایی که دمای مجاز صفحه جاذب پلاستیک فشرده برای این صفحه 90 درجه سانتی گراد بود به نظر می رسید که صفحه مناسبی باشد. بعد از خرید و انجام آزمایش ها همان طور که در مقاله اشاره شد صفحه جاذب تغییر شکل داد که به دلیل تنش های حرارتی می باشد؛ بنابراین با توجه به وجود انواع مختلف صفحات پلاستیک فشرده در بازار توصیه می شود برای کاربرد در کلکتورهای مشبک، صفحات با دمای کاری حدود 120 درجه سانتی گراد و بالاتر مدنظر قرار گیرند.

با مقایسه دو کلکتور در دبی های مختلف، مشاهده می شود 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 دبی های پایین اختلاف دمای هوای خروجی دو کلکتور کم شده و همان طور که در منحنی های مربوط به بازده مشخص است؛ راندمان دو کلکتور نیز به هم نزدیک شده اند که این امر نشانگر بهبود بازده کلکتور پلی کربنات در دبی های پایین می باشد.

#### 3-4- بررسی اثر دبی مکش

نتایج به دست آمده نشان می دهند که برای دبی های مورد بررسی، راندمان هر سه کلکتور نسبتاً پایین است و به ندرت به 35٪ می رسد. دلیل این امر سرعت مکش پایین است که باعث می شود اتلافات جابه جایی 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) امکان پذیر 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 می گیرد. 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، پلی کربنات و پلاستیک فشرده نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دبی، بازده هر سه کلکتور به صورت مجانبی افزایش یافته و برای دبی 0.1 kg/s به حدود 60 درصد می رسد. با بررسی این شکل نشان می دهد که اولاً از نظر بیشترین بازده کلکتورها به صورت کلکتور فلزی، پلاستیک فشرده و پلی کربنات دسته بندی می شوند. دوماً با افزایش دبی، اختلاف بین بازده کلکتورها افزایش می یابد. سوماً بازده کلکتور پلاستیک فشرده بسیار نزدیک به کلکتور فلزی است و می توان از این کلکتورها به عنوان جایگزین کلکتورهای فلزی استفاده نمود.

#### 5- نتیجه گیری و جمع بندی

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 صرفه جویی 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. Abulkhair, 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. Faillie, 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.

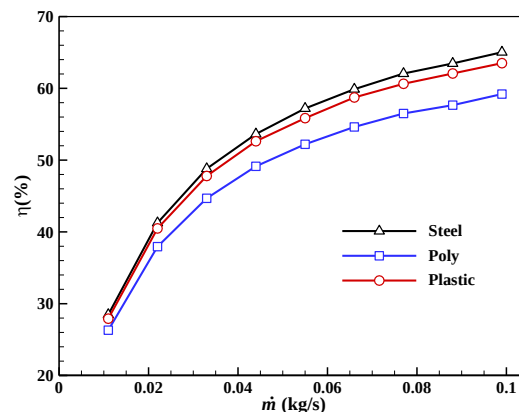


Fig. 11 Effect of mass flow of air on efficiency of metal, polycarbonate and plastic collectors

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