



بررسی تجربی عملکرد حرارتی یک نمونه‌ی اصلاح شده کلکتور لوله خلاء خورشیدی

محمد جوزی¹، فرزاد ویسی^{2*}، مرتضی غلامزاده¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* کرمانشاه، صندوق پستی 6714967346، razi.ac.ir، veysi@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1395

پذیرش: 09 بهمن 1395

ارائه در سایت: 09 اسفند 1395

کلید واژگان:

انرژی خورشیدی

بررسی تجربی

عملکرد حرارتی

کلکتور لوله خلاء

چکیده

آب گرمکن‌های خورشیدی لوله خلاء یکی از رایج‌ترین انواع آب گرمکن‌های خورشیدی هستند و در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کلکتورهای لوله خلاء در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت ضریب جذب بالاتر و اتلاف حرارتی پایین‌تری دارند. عوامل بسیاری بر عملکرد حرارتی این آب گرمکن‌ها تأثیر گذارند و تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی افزایش راندمان آن‌ها انجام شده است. در این پژوهش به صورت تجربی عملکرد حرارتی یک نمونه‌ی اصلاح شده از کلکتورهای خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نمونه‌ی آزمایشگاهی یکی با ساختار اصلاح شده و دیگری مشابه‌ی نمونه‌های تجاری، ساخته شده و تحت تابش خورشیدی برابر و دمای محیط یکسان عملکرد آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که این اصلاح ساختار تأثیر مطلوبی بر کارایی کلکتور دارد. این تغییر ساختار، توزیع دما در لوله و مخزن را یکنواخت‌تر کرد و موجب افزایش راندمان کلکتور تا 11 درصد شد. باید اضافه کرد که جذب انرژی حرارتی در مدل اصلاح شده در مدت زمان یک ساعت حدود 25 درصد بیشتر از نمونه‌ی معمولی بود. ضمن این‌که تأثیر شدت تابش خورشیدی بر دمای متوسط آب درون مخزن ذخیره در هر دو نمونه بررسی شده است. در این پژوهش از روشی تجربی جهت محاسبه‌ی تابش دریافتی لوله‌های خلاء استفاده شده است.

Experimental analysis of thermal performance of the modified vacuum tube solar collector

Mohammad Jowzi, Farzad Veysi*, Morteza Gholamzadeh

Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

* P.O.B. 6714967346, Kermanshah, Iran, veysi@razi.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 January 2017
Accepted 28 January 2017
Available Online 27 February 2017

Keywords:
Solar Energy
Experimental Study
Thermal performance
Vacuum Tube Collector

ABSTRACT

Vacuum tube solar water heaters are one of the most common types of solar water heaters, and they have been used widely in recent years. Evacuated tube solar collectors compared to flat plate collectors have higher absorption coefficient and lower heat loss. Many factors are effective on thermal efficiency of evacuated solar water heaters and many studies have been done to increase their efficiency. In this study, thermal performance of a modified model has been investigated experimentally. Two laboratory samples, one of them with the modified structure and the other like commercial samples have been made and their performance has been studied under equal solar radiation and ambient temperature. The results have shown that this structure modification has a positive effect on collector performance. This change has made the temperature distribution in the pipe and tank more uniform, and has increased the efficiency to 11 percent. Absorbing thermal energy in the modified model was more than typical model, about 25 percent in one hour. Also, effects of solar radiation on the average temperature of water in the storage tank have been investigated in both cases. In this study, an experimental method is used to calculate the radiation received by vacuum tubes.

1- مقدمه

اقلیمی مختلف مورد توجه‌ی پژوهش‌گران و صاحبان صنایع در حوزه‌ی انرژی خورشیدی هستند. به‌عنوان مثال در اواخر سال 2012 میزان آب گرمکن‌های مورد استفاده در کشور چین حدود 257 میلیون متر مربع گزارش شد که حدود 90 درصد از آن‌ها آب گرمکن‌های لوله خلاء بودند [1].

سیستم‌های حرارتی تحت خلاء را می‌توان از نظر مکانیزم انتقال حرارت به دسته‌هایی شامل کلکتورهای لوله حرارتی¹، کلکتورهای تحت خلاء با صفحات جاذب، کلکتورهای لوله خلاء (U) شکل² و کلکتورهای لوله خلاء ترموسیفونی³

انرژی خورشیدی به عنوان بزرگترین منبع انرژی زمین می‌تواند نقش ویژه‌ای در تأمین انرژی انسان ایفا کند. انرژی خورشید ضمن آن‌که آلاینده‌ی ندارد، به فراوانی در سراسر جهان در دسترس و با سیستم‌های ساده‌ای قابل استحصال است. از نگاه بسیاری از پژوهش‌گران و کارشناسان محیط زیست، انرژی خورشید کلید حل بحران‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. سیستم‌ها و روش‌های نوآورانه‌ی زیادی جهت استفاده از انرژی خورشید وجود دارد در این میان کلکتورهای لوله خلاء به دلیل ساختار ساده، راندمان بالا، هزینه‌ی ساخت و نگهداری اندک و سازگاری با شرایط

¹ Heat pipe

² U pipe evacuated tube solar collector

³ Water in glass evacuated tube solar collector

Please cite this article using:

M. Jowzi, F. Veysi, M. Gholamzadeh, Experimental analysis of thermal performance of the modified vacuum tube solar collector, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 55-62, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رابطه‌ای مطابق با استاندارد ISO 9459-2 [10]، جهت محاسبه‌ی گرمای مفید قابل برداشت کلکتورهای لوله خلاء ارائه کردند.

$$Q_u = a_1 + a_2 G + a_3 (T_{wi} - T_a) \quad (3)$$

آن‌ها همچنین برای کلکتور با زاویه 45 عنوان کردند که 9٪ از حجم مخزن هیچ‌گاه وارد تبادل حرارتی نمی‌شود. از دیگر نتایج پژوهش آن‌ها بررسی تأثیر نسبت ابعادی لوله (طول به قطر) بر طول ناحیه‌ی ساکن انتهایی لوله بود. مریسون و همکاران [11] با اندازه‌گیری دبی در کلکتور لوله خلاء به روش (PIV)⁴ و با بهره‌گیری از روش‌های عددی، جریان در کلکتورهای لوله خلاء را تحلیل کردند. آن‌ها بیان کردند که در دماهای بالاتر دبی جریان گردش⁵ افزایش می‌یابد. بطوری‌که با افزایش دمای 45 کلون دبی حدود 50 درصد افزایش می‌یابد. آن‌ها علت را کاهش لزجت سیال عامل و در نتیجه برتری گرفتن نیروی شناوری به نیروهای اصطکاکی اعلام کردند.

بودیخاردو و همکاران [12,13]، یکی از کامل‌ترین مطالعات را در زمینه‌ی کلکتورهای لوله خلاء به انجام رساندند. آن‌ها با بهره‌گیری از هر دو شیوه‌ی عددی و تجربی تأثیر پارامترهایی مانند شدت تابش خورشیدی، شیب کلکتور، نسبت ابعادی کلکتور، حجم مخزن، دمای مخزن و تأثیر نحوه‌ی توزیع شار حرارتی پیرامون لوله را بر عملکرد آب‌گرمکن بررسی و چند رابطه‌ی مفید برای آب‌گرمکن خورشیدی لوله خلاء با انتهای بسته ارائه کردند.

$$Re_d = 0.1914 \left[\frac{Nu_d Gr_d \cos \theta}{Pr} \left(\frac{L}{D} \right)^{1.2} \right]^{0.4084} \quad (4)$$

$$\eta = 0.536 - 0.8240 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right) - 0.0069 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right) \quad (5)$$

ساتو و همکاران [14]، به کمک روش‌های نرم‌افزاری⁶، طرحی مبتکرانه مطابق "شکل 2" به‌منظور از بین بردن ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله و کف مخزن ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله و مخزن از بین رفت و توزیع دما در لوله و مخزن یکنواخت‌تر شد. البته مدل عددی با داده‌های تجربی اعتبارسنجی نشده بود. در ضمن تأثیر مدل پیشنهادی بر عملکرد کلکتور نیز بررسی نشده بود.

در این پژوهش برای از بین بردن ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله سعی خواهد شد ضمن ساخت و توسعه‌ی یک نمونه‌ی آزمایشی با ساختار اصلاح شده، تأثیر این اصلاح ساختار بر عملکرد حرارتی کلکتور مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر آن توزیع دما در طول لوله و مخزن نیز بررسی خواهد شد. تأثیر تابش‌هایی با شدت مختلف بر تغییرات دمای آب مخزن نیز مطالعه می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی یک مدل مشابه نمونه‌های تجاری نیز ساخته شده و به‌طور همزمان داده‌های هر دو مدل ثبت و تحت شرایط یکسان عملکرد حرارتی آن‌ها مقایسه می‌شود (شکل 3).

2- شرح سیستم

سیستم مورد مطالعه همان‌طور که در "شکل 3" مشاهده می‌شود، شامل دو سامانه آزمایشی می‌باشد که هر دو بر روی یک سازه با زاویه‌ی 45 درجه نسبت به افق و در راستای جنوب نصب شده‌اند. هر مجموعه دارای یک کلکتور لوله خلاء محصول شرکت سولار پلار [15] و مخزنی به حجم 7 لیتر می‌باشد. دمای متوسط هر مخزن با میانگین‌گیری از دمای برداشت شده‌ی 3 سنسور دما که روی قطر مخزن مطابق "شکل 4" نصب شده‌اند، تخمین زده می‌شود.

دسته‌بندی کرد. کلکتورهای لوله خلاء ترموسیفونی از دو لوله‌ی شیشه‌ای (بروسیلیکات)¹ هم محور که خلاء نسبی بین آن‌ها برقرار است، تشکیل شده اند. لوله بیرونی با ضریب عبور بسیار بالا (حدود 95 درصد) و لوله داخلی با ضریب جذب بالا (بیش از 90 درصد) امکانی را فراهم می‌آورد که ضمن جذب بالای انرژی خورشید از اتلاف انرژی حرارتی نیز جلوگیری به عمل آید [2]. کلکتورهای لوله خلاء به‌دلیل ساختار لوله‌ای شکل این قابلیت را دارند که در طول روز به شکل غیرفعال² حرکت خورشید را دنبال کنند [3]. به عبارتی شکل لوله‌ای جاذب موجب می‌شود که در طول روز همواره خورشید به بخشی از لوله به‌صورت عمود بتابد. عوامل زیادی بر عملکرد حرارتی کلکتورهای لوله خلاء تأثیر گذارند: شرایط جغرافیایی، شیب کلکتور نسبت به افق، حجم مخزن ذخیره، فاصله‌ی بین لوله‌ی جاذب و پوشش شفاف، فاصله‌ی بین مرکز لوله‌ها، آرایش لوله‌ها، نسبت ابعادی قطر به طول لوله، توزیع شارحرارتی روی لوله جاذب، وجود ناحیه‌ی ساکن در قسمت انتهایی لوله‌های خلاء و غیره. مطالعات زیادی بر روی هر کدام از عوامل یاد شده انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

جیمز و همکاران [4] کارایی کلکتورهای مختلف را تحت شرایط پایا³ بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌های مختلفی در این زمینه انجام دادند و داده های مفیدی جهت رده‌بندی کلکتورها به‌دست آوردند. آن‌ها برای دسته‌ای از سیالات مانند هوا و آب عملکرد حرارتی را با اندازه‌گیری انرژی ورودی و خروجی سیال بررسی کردند. همچنین رابطه‌ی مفیدی جهت تعیین راندمان کلکتور با لحاظ کردن اختلاف دمای متوسط سیال و هوای بیرون ارائه دادند:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c I} \quad (1)$$

لایت هیل [5] جریان در لوله‌های عمودی که یک انتهای آن‌ها مسدود شده بود را تحت شرایط دمای دیواره ثابت مورد مطالعه قرار داد. ایشان وجود یک ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله را گزارش دادند که با عدد رایلی و نسبت ابعادی لوله (قطر به طول) رابطه‌ی مستقیم دارد:

$$T = \left(\frac{r}{L} \right) Ra \cos \theta \quad (2)$$

در این تعریف، T معیاری از طول ناحیه‌ی ساکن می‌باشد و اگر $T < 350$ باشد، آن‌گاه حتماً ناحیه ساکن رخ می‌دهد.

بهنیا و مریسون [6] و همچنین ژائو و همکاران [7] با مطالعه‌ی تجربی کلکتورهای لوله خلاء، نتایج لایت هیل را به کلکتورهای لوله خلاء تعمیم و وجود ناحیه‌ی ساکن در کلکتورهای لوله خلاء را گزارش دادند (شکل 1). طبق مطالعات آن‌ها و همچنین با دقت در رابطه‌ی (2) طول ناحیه‌ی ساکن با افزایش طول لوله‌ی جاذب افزایش می‌یابد. وجود ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله تأثیرات نامطلوبی بر عملکرد حرارتی کلکتور دارد. در کلکتور مورد مطالعه‌ی آن‌ها طول ناحیه‌ی ساکن تقریباً 0.2 طول لوله‌ی جاذب بود.

ژانگ و همکاران [8] عملکرد بیش از 1000 آب‌گرمکن خورشیدی لوله خلاء را برطبق استانداردهای کشور چین ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که عملکرد حرارتی کلکتور متأثر از تلفات حرارتی تانک و ظرفیت کلکتور می‌باشد. آن‌ها نسبت بهینه‌ی حجم مخزن به سطح کلکتور را 57-72 لیتر بر مترمربع گزارش دادند، که در این صورت راندمان کلکتور حدود 49-57 درصد است. علاوه بر این پارامترهایی مانند عایق کاری مخزن، شیب کلکتور و طول لوله‌های خلاء را بررسی کردند. مریسون و همکاران [9] با یک مطالعه‌ی تجربی و تحلیلی

⁴ Particle image velocity

⁵ Circulation

⁶ ANSYS-CFX

¹ Borosilicate

² Passive

³ Steady state

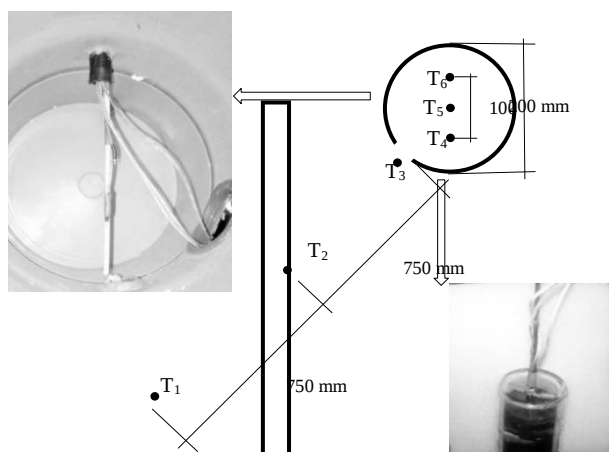


Fig.4 Position of temperature sensors in the storage tank and tube

شکل 4 موقعیت حسگرهای دما در مخزن ذخیره و لوله

برداشت اطلاعات در اردیبهشت و خرداد ماه و در شهر کرمانشاه با عرض جغرافیایی 34.2 و طول جغرافیایی 47.1 صورت گرفته است. در جدول 1 سایر مشخصات کلکتور و وسایل اندازه‌گیری آمده است. همچنین در "شکل 5" تصاویری از وسایل اندازه‌گیری نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که طول نمونه‌های تجاری لوله خلاء 180 سانتی‌متر می‌باشد اما از آنجایی که هنگام باز کردن انتهای لوله در مدل اصلاح شده قسمتی از لوله برش داده شده و طول آن به 150 سانتی‌متر کاهش پیدا کرده است. لذا برای ایجاد شرایط یکسان در هر دو مجموعه، 30 سانتی‌متر از انتهای لوله در مدل معمولی توسط یک جسم صلب پر شده و روی لوله با جسمی کدر پوشانده شده‌است تا سطح جذب و طول مؤثر در دو لوله یکسان باشد. بدیهی است که با برش دادن انتهای لوله، خلاء بین جاذب و پوشش شفاف از بین خواهد رفت و این تغییر موجب افزایش تبادل حرارتی آب درون لوله‌ی جاذب و محیط اطراف می‌شود. جهت بررسی تأثیر خلاء، یک شیر قطع و وصل جریان در مسیر کنارگذر قرارداد شده است، به‌طوری‌که اگر شیر بسته شود، شکل جریان و نحوه‌ی سیرکولاسیون درون هر دو نمونه مشابه می‌شود و از این طریق می‌توان با مقایسه‌ی نمونه اصلاح شده و نمونه معمولی به میزان تأثیر خلاء پی برد. در "شکل 3" تصویری از شیر مورد اشاره آمده است.

جدول 1 مشخصات فیزیکی اجزای سازنده‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی

Table 1 Physical Properties of experimental setup components

ابعاد (mm)	جنس یا نوع	اجزای آب گرمکن
$D_a=45, D_c=56, L=1500$	بروسیلیکات	لوله‌های خلاء
$A_a=0.212 \text{ m}^2$	منتخب ²	سطح جذب
$D=200, L=230$	پلی اتیلن	مخزن
----	آهن گالوانیزه	سازه
عدد 13	نوع K	سنسور دما
$t = 10$	پلی اتیلن ³	عایق
دقت (0.1°C) - محدوده اندازه‌گیری $-100-1300^\circ\text{C}$	لاترن مدل BTM-4208 (SD)	ثبات داده
دقت $(0.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2})$ - محدوده اندازه‌گیری $0-2000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	TES 1333R	تابش سنج

² Selective

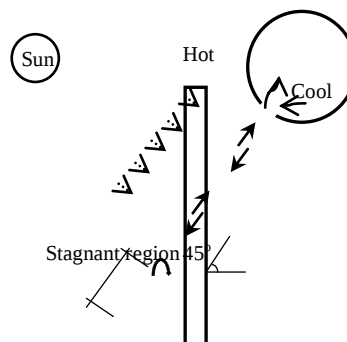
³ Polyethylene


Fig.1 Schematic of velocity distribution in a single-ended evacuated tube

شکل 1 شماتیکی از توزیع سرعت درون لوله خلاء با انتهای بسته

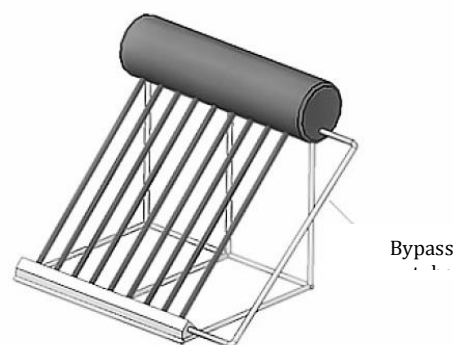


Fig. 2 Schematic view of an evacuated tube solar collector with modified geometry [14]

شکل 2 طرح‌واری یک کلکتور لوله خلاء با ساختار اصلاح شده [14]

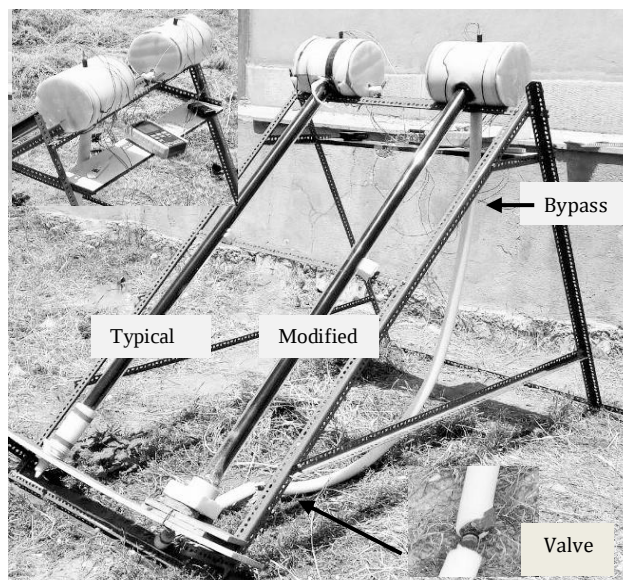


Fig. 3 A Photograph of the experimental setup

شکل 3 تصویری از نمونه‌ی آزمایشگاهی

دمای متوسط لوله با میانگین‌گیری از دمای 3 سنسور دما تعبیه شده درون لوله به‌دست می‌آید (شکل 4). خاطرنشان می‌شود که سنسورهای دما دقیقاً در مرکز لوله قرار داده شده‌اند. دمای سنسورهای دما توسط ثبات داده¹ در طول روز و در هر یک دقیقه ثبت می‌شود.

¹ Data logger

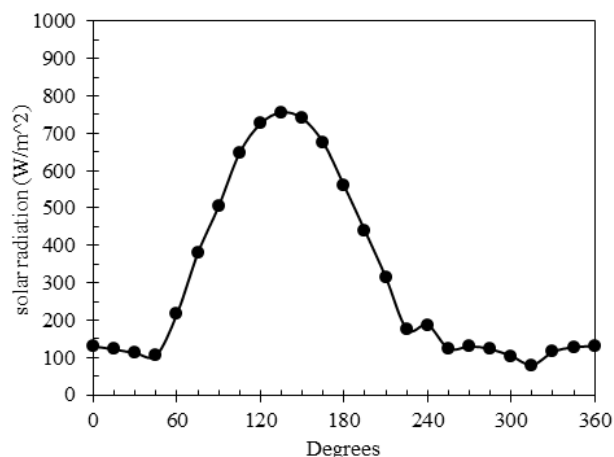


Fig.7 Radiation distribution diagram around the absorber tube at 9:30 (solar time)

شکل 7 نمودار توزیع تابش پیرامون لوله‌ی جاذب در ساعت خورشیدی 30:9

3- بحث و نتایج

3-1- توزیع دما در نمونه‌های آزمایشی

تغییرات دمای متوسط آب درون مخازن در مدل اصلاح شده (T_{m1}) و مدل معمولی (T_{m2}) تحت تابش خورشید در مدت یک ساعت ثبت و در "شکل 8" نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار پیداست در ازای دریافت تابش یکسان، دمای متوسط سیال درون مخزن نمونه‌ی اصلاح شده با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. لذا دمای متوسط آب مخزن در نمونه‌ی اصلاح شده پس از گذشت زمان یک ساعت، 1.4 سلسیوس بیشتر از دمای متوسط آب مخزن کلکتور معمولی افزایش می‌یابد. محاسبات نشان داد که این افزایش دما معادل آن است که مخزن آب گرمکن اصلاح شده حدود 25٪ گرمای بیشتر دریافت کرده است.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{mC_p\Delta T_1}{mC_p\Delta T_2} = \frac{6.7}{5.3} = 1.26 \quad (7)$$

می‌توان این‌گونه استدلال کرد که وجود جریان بازگشتی موجب تسهیل سیرکولاسیون و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر بین لوله و مخزن می‌شود. از طرف دیگر بواسطه‌ی مسیر کنارگذر و از بین رفتن ناحیه‌ی ساکن در انتهای لوله حجم بیشتری از سیال عامل در تبادل حرارتی شرکت می‌کند و امکانی فراهم می‌شود که گرمای جذب شده توسط قسمت انتهایی لوله به سیال درون مخزن منتقل شود. به تعبیری، سیال سرد کف مخزن از طریق مسیر ایجاد شده به قسمت انتهایی لوله منتقل می‌شود و موجب می‌شود که آب گرم انتهای لوله به قسمت میانی و فوقانی لوله منتقل شود. در قسمت میانی و فوقانی لوله شدت سیرکولاسیون بیشتر است و در نتیجه تبادل حرارتی بین مخزن و لوله تسهیل می‌شود.

در مورد آب درون لوله‌ی جاذب اوضاع متفاوت است زیرا دمای آب لوله با توجه به "شکل 9" در هر دو کلکتور (T_{m-1} , T_{m-2}) تقریباً با نرخ یکسانی افزایش می‌یابد. در تعبیر این رفتار این‌گونه می‌توان بیان کرد که اگرچه گرمای جذب شده توسط مدل اصلاح شده بیشتر است، اما این گرما اکثراً به مخزن منتقل می‌شود و دمای سیال درون لوله در هر دو مدل تقریباً به یک اندازه افزایش می‌یابد. ضمن آن‌که نباید از تأثیر نبود خلاء در لوله‌ی کلکتور اصلاح شده که اتلافات حرارتی را شدت می‌بخشد چشم‌پوشی کرد.

جهت تعیین میزان تابش دریافتی لوله‌های خلاء از یک وسیله‌ی اندازه‌گیری تابش خورشید مطابق "شکل 6" استفاده شده است. همان‌طور که در "شکل 6" دیده می‌شود یک تابش سنج عمود بر محور لوله نصب شده و لوله روی سازه‌ی نگهدارنده با زاویه‌ی 45 نسبت به افق و در راستای جنوب نصب شده است. با توجه به "شکل 6" محیط لوله به زوایای 15 درجه ای تقسیم شده و با چرخاندن لوله امکان اندازه‌گیری دقیق تابش پیرامون لوله فراهم آمده است. تابش خورشید نیز در حین اندازه‌گیری دمای کلکتورها هر 10 دقیقه یکبار ثبت شده است. به‌عنوان نمونه نتایج اندازه‌گیری برای ساعت 30:9 مطابق "شکل 7" می‌باشد. ملاحظه می‌شود در قسمتی از لوله که به سمت خورشید است لوله تابش بیشتری را دریافت می‌کند اما در نیمه‌ی پشتی لوله توزیع تابش تقریباً یکنواخت و بسیار کمتر از تابش پیشینه می‌باشد. لذا تابش کل پیرامون لوله از رابطه‌ی (6) به‌دست می‌آید.

$$G_{tot} = \frac{1}{24} \pi D_a L \sum_{i=1}^2 G_i \quad (6)$$

در رابطه‌ی (6) کمیت G_i مقادیر اندازه‌گیری شده شدت تابش خورشید توسط تابش‌سنج و G_{tot} تابش خالص دریافتی هر کلکتور برحسب وات می‌باشد. به عنوان مثال مقدار G_{tot} در ساعت 30:9 حدود 70 وات می‌باشد. شایان ذکر است که در "شکل 6" زاویه‌ی 90 درجه راستای بردار نرمال صفحه‌ی کلکتور را نشان می‌دهد و شدت تابش در این راستا با علامت G در نمودارها نمایش داده می‌شود.



Fig. 5 Measuring instruments

شکل 5 تجهیزات اندازه‌گیری

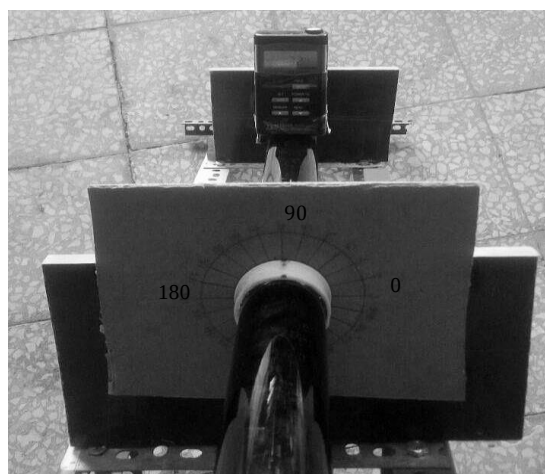


Fig. 6 A photograph of the measuring Device for intensity of radiation around the tube

شکل 6 تصویری از وسیله‌ی اندازه‌گیری شدت تابش پیرامون لوله

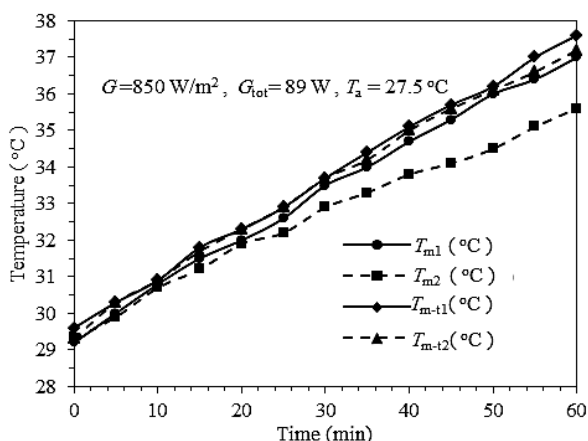


Fig. 10 The effect of bypass line on temperature distribution in the tank and tube

شکل 10 تأثیر لوله‌ی بازگشتی بر توزیع دمای آب در لوله و مخزن ذخیره

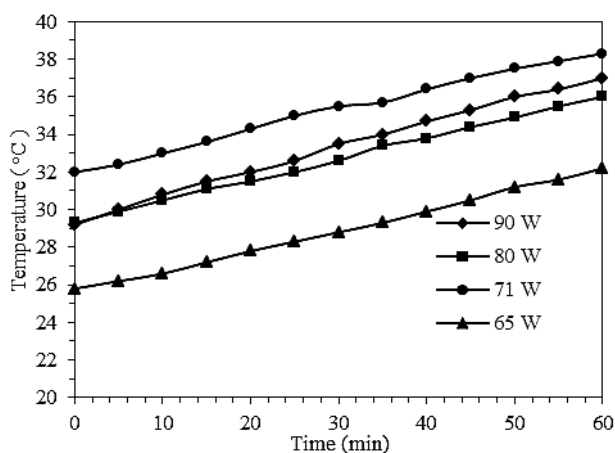


Fig. 11 changes in the mean temperature of the water in the tank under the different radiation intensity in the modified model

شکل 11 تغییرات دمای متوسط مخزن در مدل اصلاح شده تحت تابش‌های مختلف

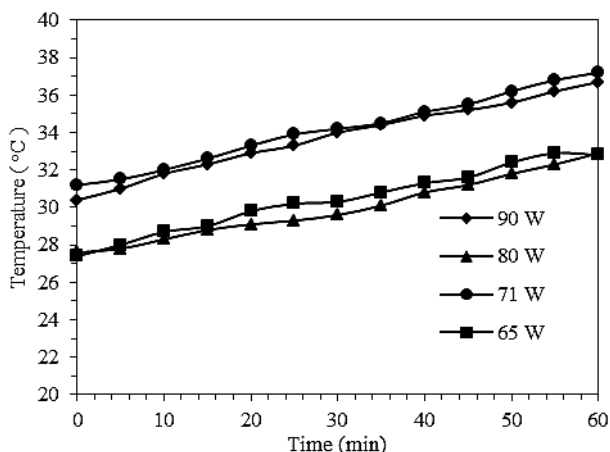


Fig. 12 The changes in the mean temperature of the water in the tank under the different radiation intensity in the typical model

شکل 12 تغییرات دمای متوسط مخزن در مدل معمولی تحت تابش‌های مختلف

در نتیجه‌ی این تغییر در انتهای لوله یک ناحیه‌ی ساکن همانند نمونه‌ی معمولی شکل می‌گیرد. حال که نحوه‌ی سیرکولاسیون و شرایط محیطی و فیزیکی در هر دو نمونه یکسان است، می‌توان با مطالعه‌ی تغییرات دمای آب

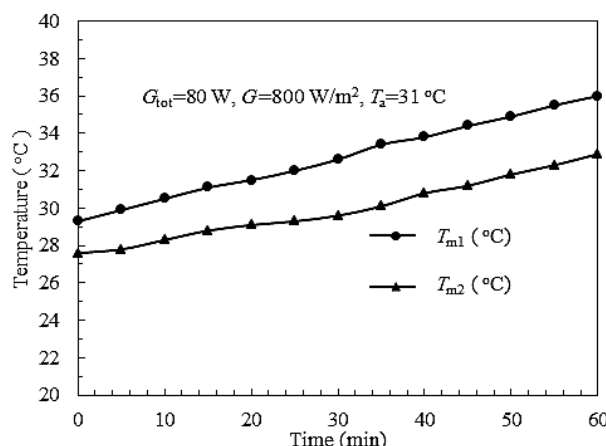


Fig. 8 The mean temperature of water in the tank in the modified model and typical model the

شکل 8 دمای متوسط آب مخزن ذخیره در مدل اصلاح شده و مدل معمولی

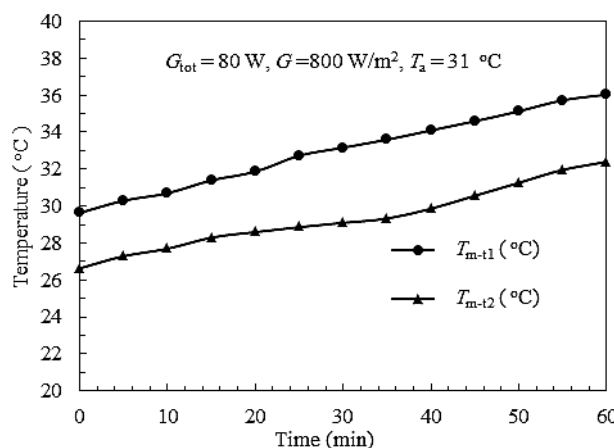


Fig. 9 The mean temperature of water in the tube in the modified model and typical model

شکل 9 دمای متوسط آب لوله در مدل اصلاح شده و مدل معمولی

با توجه به "شکل 10" وجود جریان بازگشتی در مدل اصلاح شده موجب شده است که توزیع دما در مخزن و لوله یکنواخت‌تر گردد [14]. در واقع به دلیل وجود ناحیه‌ی ساکن در مدل معمولی، دمای قسمت انتهایی لوله مرتباً افزایش می‌یابد، بدون آن‌که در تبادل حرارتی نقشی داشته باشد. این نقص در مدل اصلاح شده کاملاً مرتفع گشته و امکانی فراهم آمده که آب گرم قسمت انتهایی لوله نیز به مخزن منتقل شود که در نتیجه برداشت انرژی از دیواره‌ی لوله افزایش می‌یابد. در مقابل آب سرد کف مخزن نیز به لوله منتقل می‌شود و ضمن از بین رفتن ناحیه‌ی راکد در کف مخزن، توزیع دما در کلکتور اصلاح شده یکنواخت‌تر از کلکتور معمولی می‌شود (شکل 10).

در تحلیلی دیگر رابطه‌ی بین تغییرات دمای متوسط آب درون مخزن‌ها و شدت تابش‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. آنچه که به وضوح از "شکل 11 و 12" پیداست، حاکی از این است که تغییرات دمای متوسط آب درون مخزن مدل اصلاح شده نسبت به تابش خورشید بیش از مدل معمولی می‌باشد. از این رو می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در تابش‌های بیشتر عملکرد حرارتی آب گرمکن اصلاح شده بهتر از مدل معمولی می‌باشد.

با بستن شیر قطع و وصل جریان که در مسیر لوله بای‌پس قرار داده شده است، شکل جریان گردشی در کلکتور اصلاح شده نیز مشابه جریان در کلکتور معمولی می‌شود و امکان مقایسه و بررسی تأثیر خلاء فراهم می‌شود.

زمانی حداقل 15 دقیقه‌ای می‌باشد. اگر شرایط فوق مهیا باشد راندمان کلکتور از رابطه‌ی (8) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A_a G} \quad (8)$$

که در آن T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای خروجی و ورودی به کلکتور و A_a سطح جذب تابش خورشیدی می‌باشد. اما در کلکتورهای لوله خلاء ترموسیفونی امکان استفاده از روش فوق وجود ندارد چرا که جریان ورودی و خروجی کلکتور در درون خود لوله‌ی جذب برقرار می‌گردد و در نتیجه تفکیک و اندازه‌گیری دقیق جریان ممکن نیست. لذا اگر مخزن ذخیره مانند "شکل 15" به‌عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شود، منطقی خواهد بود اگر مجموع انرژی ذخیره شده در مخزن و اتلافات حرارتی در یک بازه‌ی زمانی مشخص به‌عنوان انرژی مفید دریافتی کلکتور در نظر گرفته شود.

یکتا و همکاران [19] نیز راندمان کلکتور لوله خلاء را این‌چنین تعریف کرده‌اند:

$$\eta = \frac{m_{tank} C_p \Delta T}{G A_a \Delta t} \quad (9)$$

در این پژوهش، راندمان کلکتور با استفاده از روش یکتا و همکاران [19] محاسبه می‌شود و سپس با رابطه‌ای مشابه رابطه‌ی ارائه شده در استاندارد ISO 9806 تقریب زده می‌شود:

$$\eta = -a_0 G \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right)^2 - a_1 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right) + \eta_0 \quad (10)$$

که در آن T^* میانگین دمای مخزن در ابتدا و انتهای آزمایش، T_a دمای محیط و G شدت تابش روی هر لوله خلاء می‌باشد. ضرایب رابطه‌ی فوق با استفاده از داده‌های تجربی که طی چندین روز جمع‌آوری شده‌اند، به دست می‌آیند. داده‌های تجربی به صورت نقاط پراکنده با استفاده از رابطه‌ی (9) و برای بازه‌های زمانی 30 دقیقه‌ای به‌دست آمده و در "شکل 16 و 17" مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است که در استانداردهای مربوطه حداقل بازه‌ی زمانی 15 دقیقه تعریف شده و می‌توان بازه زمانی بزرگتری را نیز تعریف کرد.

با توجه به نمودار "شکل 16"، رابطه‌ی (11) جهت محاسبه‌ی راندمان آب گرمکن اصلاح شده ارائه می‌شود:

$$\eta_1 = -6.883 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right)^2 - 0.516 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right) + 0.77 \quad (11)$$

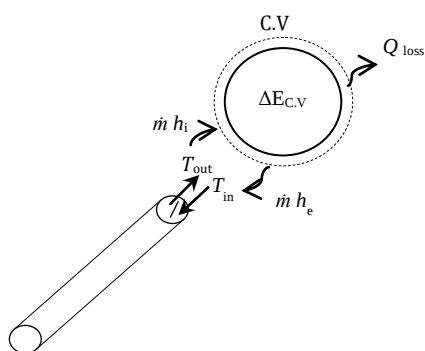


Fig. 15 Schematic of heat and mass transfer between the vacuum tube collector and storage tank

شکل 15 شماتیکی از تبادل جرم و حرارت بین کلکتور لوله خلاء و مخزن ذخیره

درون مخزن و لوله به تأثیر عدم خلاء در کلکتور اصلاح‌شده پی برد. در "شکل 13 و 14" تغییرات دمای آب درون مخزن و لوله‌ی جذب در حالتی که شیر قطع و وصل جریان کاملاً بسته است، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این‌بار برخلاف حالت قبل، دمای آب درون مخزن و لوله در آب گرمکن معمولی افزایش دمای بیشتری را نسبت به آب گرمکن اصلاح شده تجربه کرده است. دلیل آن عدم وجود خلاء بین لوله‌ی جذب و پوشش شفاف در کلکتور اصلاح شده است (در کلکتور اصلاح شده به دلیل بازکردن انتهای لوله، خلاء از بین رفته است) که اتلاف حرارتی از لوله را شدت می‌بخشد همین موضوع باعث می‌شود که دمای متوسط آب درون مخزن در مدل معمولی (T_{m2}) حدود 1 درجه سلسیوس بیشتر از نمونه‌ی اصلاح شده (T_{m1}) افزایش یابد.

2-3- محاسبه‌ی راندمان

دو روش متفاوت برای محاسبه‌ی راندمان در کلکتورهای لوله خلاء وجود دارد: روش حالت پایا و روش شبه دینامیکی [17]. در روش نخست دمای محیط، تابش خورشید، و خواص فیزیکی آب ثابت فرض می‌شوند. اما در روش شبه دینامیکی این کمیت‌ها متغیر در نظر گرفته می‌شوند [3]. در استانداردهای مربوط به کلکتورهای خورشیدی ISO 9806 [18] شرط تعیین راندمان کلکتور، پایداری و اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی کلکتور در بازه‌های

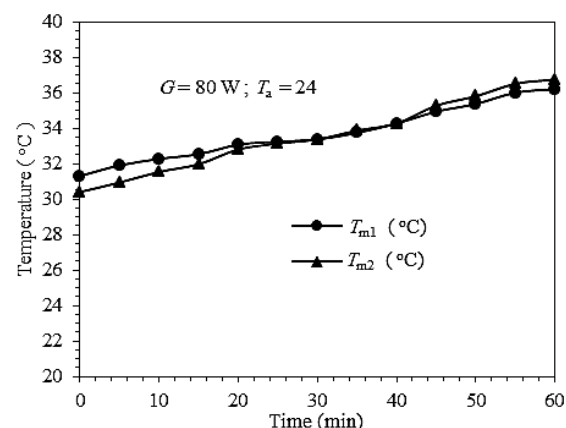


Fig. 13 The mean temperature of the water in tank in the modified model and the typical model when the valve is closed

شکل 13 دمای متوسط آب مخزن در مدل اصلاح شده و معمولی در حالت شیر بسته

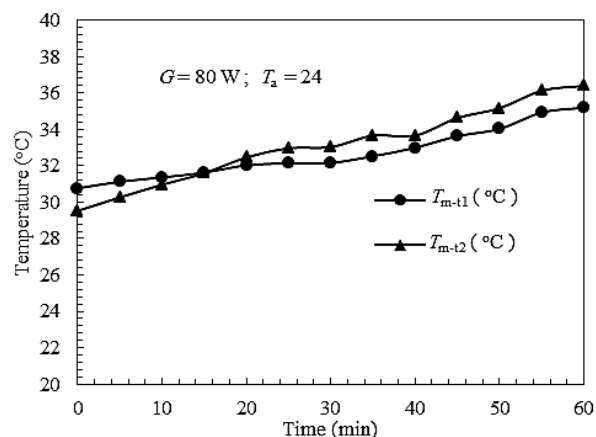


Fig. 14 The mean temperature of the water in tube in the modified model and typical model when the valve is closed

شکل 14 دمای آب درون لوله در مدل اصلاح شده و مدل معمولی در حالت شیر بسته

4- نتیجه گیری

ساختار اصلاح شده با تسهیل گردش سیال و از بین بردن ناحیه‌ی ساکن در لوله موجب افزایش راندمان آب گرمکن تا 11 درصد شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مخزن نمونه‌ی اصلاح شده در شرایط تابشی یکسان و در مدت یک ساعت، 25 درصد گرمای بیشتر دریافت کرد. علی‌رغم این که خلاء بین لوله‌ی جاذب و پوشش شفاف از بین رفت اما سیال درون مخزن در مدل اصلاح شده 1.4 سلسیوس افزایش دمای بیشتری را تجربه کرد. لذا می‌توان این‌چنین نتیجه گیری کرد که کلکتور مدل اصلاح شده عملکرد حرارتی مناسب‌تری از مدل معمولی دارد.

با توجه به این که با افزایش نسبت ابعادی لوله‌های خلاء طول ناحیه‌ی ساکن افزایش می‌یابد انتظار می‌رود در طول‌های بیشتر نمونه‌ی اصلاح شده عملکرد حرارتی مناسب‌تری از نمونه‌ی معمولی داشته باشد. لذا طرح پیشنهادی محدودیت طول لوله که همواره چالشی در طراحی کلکتورهای بزرگ‌تر بوده است را مرتفع می‌سازد.

5- فهرست علائم

A_C	سطح گردآورنده (m^2)
A_a	سطح جذب (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه آب در فشار ثابت ($J/kg \cdot ^\circ C$)
G	شدت تابش موجود بر روی سطح کلکتور (W/m^2)
G_{tot}	کل تابش روی لوله (W)
Gr	عدد گرافش
I	شدت تابش خورشیدی (W/m^2)
$\dot{m}$	دبی جرمی سیال (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
Q_U	انرژی گرمایی مفید قابل برداشت (W)
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
T^*	دمای معیار (متوسط دمای سیال در ابتدا و انتهای بازه زمانی) ($^\circ C$)
T_a	دمای محیط ($^\circ C$)
$T_{f,i}$	دمای ورودی سیال ($^\circ C$)
$T_{f,o}$	دمای خروجی سیال ($^\circ C$)
T_m	دمای متوسط آب درون مخزن ($^\circ C$)
$T_{m,t}$	دمای متوسط آب درون لوله ($^\circ C$)
UPETSC	گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلاء (U) شکل
WGETSC	گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلاء ترموسیفونی
η	راندمان آب گرمکن
ζ	نسبت اختلاف دمای معیار و دمای محیط به تابش خالص روی لوله ($^\circ C/W$)

6- مراجع

- [1] L. Zhentao, H. Zhichen, X. Guangming, Development report for Chinese solar thermal industry, *Solar Energy*, Vol. 98, No. 8, pp. 7-10, 2012.
- [2] D. Nkwetta, M. Smyth, A. Zacharopoulos, T. Hyde. In-door experimental analysis of concentrated and non-concentrated evacuated tube heat pipe collectors for medium temperature

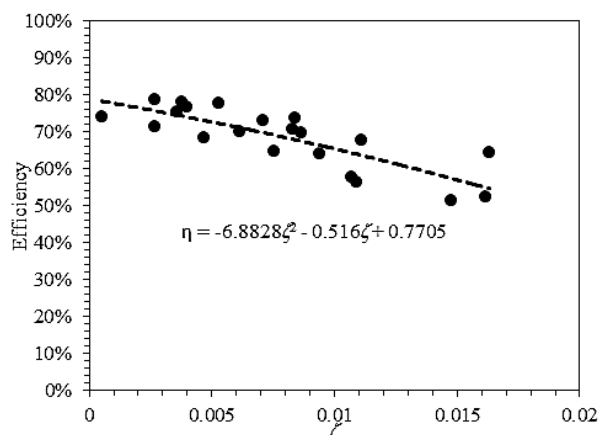


Fig. 16 Efficiency of the modified model

شکل 16 راندمان مدل اصلاح شده

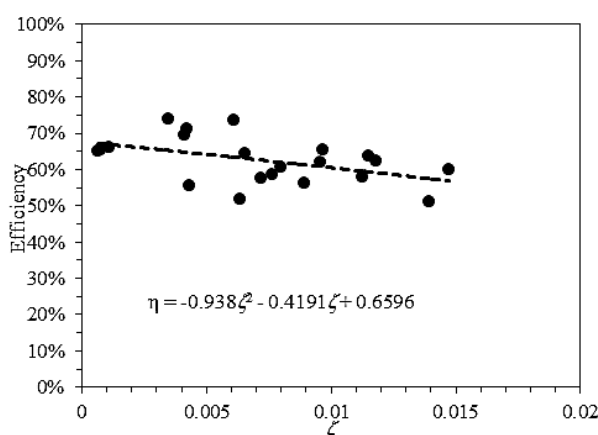


Fig. 17 Efficiency of the typical model

شکل 17 راندمان مدل معمولی

در "شکل 17 و 16" پارامتر ζ نماینده‌ی عبارت $(T^* - T_a)/G$ می‌باشد. همان‌طور که از شکل معادله پیداست وقتی که پارامتر ζ به سمت صفر میل می‌کند (اختلاف دمای محیط و آب درون کلکتور صفر می‌شود) به دلیل نبود اتلافات حرارتی راندمان بیشینه و معادل 77 درصد می‌باشد. با توجه به "شکل 17"، رابطه‌ی (12) جهت محاسبه‌ی راندمان آب گرمکن معمولی ارائه می‌شود:

$$\eta_2 = -0.938 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right)^2 - 0.419 \left(\frac{T^* - T_a}{G} \right) + 0.66 \quad (12)$$

در آب گرمکن معمولی راندمان در حالت بیشینه 66 درصد می‌باشد. همان‌طور که از روابط (11 و 12) پیداست راندمان کلکتور اصلاح شده می‌تواند تا 11 درصد بیشتر از راندمان کلکتور معمولی باشد. اما دو عامل موجب می‌شود که با افزایش کمیته ζ راندمان مدل اصلاح شده کاهش یابد و به راندمان مدل معمولی نزدیک شود:

- تابش خورشید: همان‌طور که پیشتر اشاره شد کلکتور اصلاح شده حساسیت بیشتری نسبت به تابش خورشید دارد و در تابش‌های پایین (ساعات ابتدایی و انتهایی روز) راندمانی در حد کلکتور معمولی دارد.
- اختلاف دمای معیار با محیط: از آن‌جایی که خلاء بین لوله‌ی جاذب و پوشش شفاف در کلکتور با انتهای باز از بین رفته است لذا هنگامی که اختلاف دمای سیال درون کلکتور با محیط اطراف زیاد است، تلفات حرارتی زیاد می‌شود و در نتیجه راندمان قدری کاهش می‌یابد.

- [11] G. Morrison, I. Budihardjo, M. Behnia, Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater, *Solar Energy*, Vol. 78, No. 2, pp. 257–267, 2005.
- [12] I. Budihardjo, G. Morrison, M. Behnia, Natural circulation flow through water-in-glass evacuated tube solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 81, No. 12, pp. 1460–1472, 2007.
- [13] G. Morrison, I. Budihardjo, Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy*, Vol. 83, No. 1, pp. 49–56, 2009.
- [14] A. I. Sato, V. L. Scalón, A. Padilha, Análise numérica de coletor solar com tubo evacuado, *Actas do X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica - CIBEM10*, Porto-Portugal: R.M. Natal Jorge, 2011.
- [15] Company products, Evacuated tube solar collectors, Accessed on 15 July 2016; <http://www.solarpolar.ir/products>. (in Persian فارسی)
- [16] A. shariyah, G. lof, The optimization of tank-volume to collector area ratio for a thermosyphon solar water heater, *Renewable Energy*, Vol. 7, No. 3, pp. 289–300, 1995.
- [17] L. Xu, Z. Wang, G. Yuan, X. Li, A new dynamic test method for thermal performance of all-glass evacuated solar air collectors, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 5, pp. 1222–1231, 2012.
- [18] ISO 9806-2, Solar energy—Solar thermal collectors—Test methods, *International Standards Organisation*, 2013.
- [19] A. Yekta, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, The effect of tube aspect ratio on the efficiency of water in glass evacuated tube solar water heaters, *CJASR-t* 1495, 2015.
- applications, *Energy Building*, Vol. 47, pp. 674–681, 2012
- [3] M. Sabiha, R. Saidur, S. Mekhilef, O. Mahian, Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1038–1054, 2015.
- [4] E. Hill James, R. Streed Elmer, A method of testing for rating solar collectors based on thermal performance, *Solar Energy*, Vol. 18, No. 5, pp. 421–429, 1976.
- [5] M. Lighthill, Theoretical considerations on free convection in tubes, *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 6, pp. 398–439, 1953.
- [6] M. Behnia, G. Morrison, An experimental investigation of inclined open thermosyphons. *Solar Energy*, Vol. 47, No. 4, pp. 313–326, 1991.
- [7] F. Gaa, M. Behnia, G. Morrison, Experimental study of flow rates through inclined open thermosyphons, *Solar Energy*, Vol. 57, No. 5, pp. 401–408, 1996.
- [8] X. Zhang, S. You, W. Xu, M. Wang, T. He, X. Zheng, Experimental investigation of the higher coefficient of thermal performance for water in-glass evacuated tube solar water heaters in china, *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, PP. 386–392, 2014.
- [9] G. Morrison, I. Budihardjo, M. Behnia, Water-in-glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy*, Vol. 76, No. 3, pp. 135–140, 2004.
- [10] ISO 9459-2, Solar heating—domestic water heating systems. Performance test for solar only systems, *International Standards Organisation*, Geneva, 1994.