ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

محمد جوزى¹، فرزاد ويسى^{2*}، مرتضى غلامزاده¹

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* كرمانشاه، صندوق پستى 6714967346، veysi@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 12 دی 1395 پذیرش: 09 بهمن 1395 ارائه در سایت: 09 اسفند 1395	آبگرمکنهای خورشیدی لوله خلاء یکی از رایجترین انواع آبگرمکنهای 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 آبگرمکنها تأثیر گذارند و تحقیقات بسیاری در زمینهی افزایش راندمان آنها انجام شده است. در این پژوهش به
کلید واژگان:	صورت تجربی عملکرد حرارتی یک نمونهی اصلاح شده از کلکتورهای خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نمونهی آزمایشگاهی یکی
انرژی خورشیدی	با ساختار اصلاح شده و دیگری مشابهی نمونههای تجاری، ساخته شده و تحت تابش خورشیدی برابر و دمای محیط یکسان عملکرد آنها مورد
بررسی تجربی عملکرد حرارتی کلکتور لوله خلاء	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 یکنواخت ر کرد و موجب افزایش راندمان کلکتور تا 11درصد 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 این که تأثیر شدت تابش خورشیدی بر دمای متوسط آب درون مخزن ذخیره در ه. ده نمانه بینس شده است در این شدهش از رشت تحریب حدت محاسبه، تالش دریافتر ماهمای خلال 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	ABSTRACT	
Original Research Paper Received 01 January 2017 Accepted 28 January 2017 Available Online 27 February 2017	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	
Keywords: Solar Energy Experimental Study Thermal performance Vacuum Tube Collector	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 پژوهش گران و صاحبان صنایع در حوزهی انرژی خورشیدی هستند. به عنوان مثال در اواخر سال 2012 میزان آب گرمکن های 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 می توان از نظر مکانیزم انتقال حرارت به دستههایی شامل کلکتورهای لوله حرارتی'، کلکتورهای تحت خلاء با صفحات جاذب، کلکتورهای لوله خلاء (U) شکل ^۲و کلکتورهای لوله خلاء ترموسیفونی ^۳

انرژی خورشیدی به عنوان بزرگترین منبع انرژی زمین میتواند نقش ویژهای در تأمين انرژی انسان ايفا کند. انرژی خورشيد ضمن آن که آلايندگی ندارد، به فراوانی در سراسر جهان در دسترس و با سیستمهای سادهای قابل استحصال است. از نگاه بسیاری از پژوهش گران 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 بهدلیل ساختار ساده، راندمان بالا، هزینهی ساخت و نگهداری اندک و سازگاری با شرایط

55-62, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

¹ Heat pipe

U pipe evacuated tube solar collector ³ Water in glass evacuated tube solar collector

دستهبندی کرد. کلکتورهای لوله خلاء ترموسیفونی از دو لوله شیشهای (بروسیلیکات⁽) 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 غیرفعال^۲ 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 افق، حجم مخزن ذخیره، فاصلهی بین لولهی جاذب و پوشش شفاف، فاصلهی بین مرکز لولهها، آرایش لولهها، نسبت ابعادی قطر به طول لوله، توزیع خلاء و غیره. مطالعات زیادی بر روی هر کدام از عوامل یاد شمت انتهایی لولههای خلاء و غیره. مطالعات زیادی بر روی هر کدام از عوامل یاد شده انجام شده است که در ادامه به تعادی از آنها پرداخته خواهد شد.

جیمز و همکاران [4] کارایی کلکتورهای مختلف را تحت شرایط پایا^۳ 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 اندازه گیری 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:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_{\rm p}(T_{\rm f,o} - T_{\rm f,i})}{A_{\rm c}I}$$
(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 (قطربه طول) رابطهی مستقیم دارد:

$$T = \left(\frac{r}{t}\right) \operatorname{Ra}\cos\theta \tag{2}$$

در این تعریف، T معیاری از طول ناحیهی ساکن می باشد و اگر 350/T باشد، آن گاه 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 (شکل1). 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 72-57 لیتر بر مترمربع گزارش دادند، که در این صورت راندمان کلکتور حدود 57-49 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

$$Q_{\rm u} = a_1 + a_2 G + a_3 (T_{\rm wi} - T_{\rm a}) \tag{3}$$

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 انتهای لوله بود. مریسون و همکاران [11] با اندازه گیری دبی در کلکتورهای لوله خلاء به روش (PIV)¹ وبا بهره گیری از روشهای عددی، جریان درکلکتورهای لوله خلاء را تحلیل کردند. آنها بیان کردند که در دماهای بالاتر دبی جریان گردشی⁴ افزایش مییابد. بطوری که با افزایش دمای 45 کلوین دبی حدود 50 درصد افزایش مییابد. آن ها علت را کاهش لزجت سیالِ عامل و درنتیجه برتری گرفتن نیروی شناوری به نیروهای اصطکاکی اعلام کردند.

بودیخاردو و همکاران [13,12]، یکی از کاملترین مطالعات را در زمینه ی کلکتورهای لوله خلاء به انجام رساندند. آنها با بهره گیری از هر دو شیوه ی عددی و تجربی تأثیر پارامترهایی مانند شدت تابش خورشیدی، شیب کلکتور، نسبت ابعادی کلکتور، حجم مخزن، دمای مخزن و تأثیر نحوه ی توزیع شار حرارتی پیرامون لوله را بر عملکرد آب گرمکن بررسی و چند رابطه ی مفید برای آب گرمکن خورشیدی لوله خلاء با انتهای بسته ارائه کردند.

$$\operatorname{Re}_{d} = 0.1914 \left[\frac{\operatorname{Nu}_{d} \operatorname{Gr}_{d} \cos \theta}{\operatorname{Pr}} \left(\frac{L}{D} \right)^{1.2} \right]^{0.4084}$$
(4)

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

ساتو و همکاران[14]، به کمک روشهای نرمافزاری ^{*}، 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. به منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی یک مدل مشابه نمونههای تجاری نیز ساخته شده و به طور همزمان دادههای هر دو مدل ثبت و تحت شرایط یکسان عملکرد حرارتی آنها مقایسه میشود (شکل3).

2- شرح سیستم

سیستم مورد مطالعه همان طور که در "شکل 3" مشاهده می شود، شامل دو سامانه آزمایشی می باشد 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 می باشد. دمای متوسط هر مخزن با میانگین گیری از دمای برداشت شدهی 3 سنسور دما که روی قطر مخزن مطابق "شکل 4" نصب شدهاند، تخمین زده می شود.

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.13.7

¹ Borosilicate

² Passive ³ Steady state

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

⁴ Particle image velocity

Circulation

⁶ ANSYS-CFX



Fig.4 Position of temperature sensors in the storage tank and tube شکل 4 موقعیت حسگرهای دما در مخزنِ ذخیرہ 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 ۱ سایر مشخصات کلکتور و وسایل اندازه گیری آمده است. همچنین در "شکل 5" تصاویری از وسایل اندازه گیری 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 شده است 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 لوله یا جذب و محیط اطراف میشود. جهت بررسی تأثیر خلاء، یک شیر قطع بسته شود، شکل جریان و نحوه یسیر کولاسیون درون هر دو نمونه مشابه میشود و از این طریق میتوان با مقایسه ی نمونه اصلاح شده و نمونه ی معمولی به میزان تأثیر خلاء پی برد. در "شکل 3" تصویری از شیر مورد اشاره آمده است.

ول 1 مشخصات فیزیکیِ اجزای سازندہی نمونہی آزمایشگاہی	عد
ble 1 Physical Properties of experimental setup components	

Table 1 Physical Properties of experimental setup components			
ابعاد (mm)	جنس يا نوع	اجزای آب گرمکن	
D _a =45, D _c =56 L=1500	بروسيليكات	لولەھاي خلاء	
$A_{\rm a}$ =0.212 m ²	منتخب	سطح جذب	
D=200, L=230	پلی اتیلن	مخزن	
	آهن گالوانيزه	سازه	
13عدد	نوع K	سنسور دما	
t = 10	پلی اتیلن ^۳	عايق	
دقت (0.1°C)- محدوده اندازه گیری	لاترن مدل(BTM-4208	ثبات داده	
-100-1300 °C	(SD		
دقت (0.1 W)- محدوده اندازه گیری 0 -2000 W m ²	TES 1333R	تابش سنج	

² Selective



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

شکل 1 شماتیکی ازتوزیع سرعت درون لوله خلاء با انتهای بسته



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

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



Fig. 3 A Photograph of the experimental setup شکل3 تصویری از نمونه ی آزمایشگاهی

دمای متوسط لوله با میانگین گیری از دمای 3 سنسور دما تعبیه شده درون لوله بهدست میآید (شکل4). خاطرنشان میشود که سنسورهای دما دقیقا در مرکز لوله قرار داده شدهاند. دمای سنسورهای دما توسط ثبات داده ^۱ در طول روز و در هر یک دقیقه ثبت میشود.

³ Polyethylene

¹ Data logger

محمد جوزی و همکا*ر*ان

جهت تعیین میزان تابش دریافتی لولههای خلاء از یک وسیلهی اندازه گیری تابش خورشید مطابق "شکل 6" استفاده شده است. همان طور که در "شکل 6" دیده می شود 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 اندازه گیری دقیق تابش پیرامون لوله فراهم آمده است. تابش خورشید نیز در حین اندازه گیری دمای کلکتورها هر 10 دقیقه یکبار ثبت شده است. بهعنوان نمونه نتایج اندازه گیری برای ساعت 90 مطابق "شکل 7" می باشد. 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 بیشینه میباشد. لذا تابش کل پیرامون لوله از رابطهی (6) بهدست میآید.

$$G_{\rm tot} = \frac{1}{24} \pi D_{\rm a} L \sum_{1}^{2} G_{i} \tag{6}$$

در رابطهی (6) کمیت G_i مقادیر اندازه گیری شده شدت تابش خورشید توسط تابش سنج 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 می شود.



Fig .5 Measuring instruments

شکل 5 تجهیزات اندازه گیری



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

شکل6 تصویری از وسیلهی اندازهگیری شدت تابش پیرامون لوله



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

شکل7 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_m) و مدل معمولی (T_m) تحت تابش خورشید در مدت یک ساعت ثبت و در "شکل 8" نشان داده شده است. همان طور که از نمودار پیداست در ازای دریافت تابش یکسان، دمای متوسط سیال درون مخزنِ نمونهی اصلاح شده با نرخ بیشتری افزایش می یابد. لذا دمای متوسط آب مخزن در نمونهی اصلاح شده پس از گذشت زمان یک ساعت، 1.4 سلسیوس بیشتر از دمای متوسط آب مخزنِ کلکتور معمولی افزایش می یابد. محاسبات نشان داد که این افزایش دما معادل آن است که مخزن آب گرمکن اصلاح شده حدود 25٪ گرمای بیشتر دریافت کرده است.

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

میتوان این گونه استدلال کرد که وجود جریان بازگشتی موجب تسهیل سیر کولاسیون 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 می شود و موجب می شود 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-tl}, T_{m-t2}) تقریبا با نرخ یکسانی افزایش می یابد. در تعبیر این رفتار این گونه می توان بیان کرد که اگرچه گرمای جذب شده توسط مدل اصلاح شده بیشتر است، اما این گرما اکثراً به مخزن منتقل می شود و دمای سیال درون لوله در هر دو مدل تقریبا به یک اندازه افزایش می یابد. ضمن آن که نباید از تأثیر نبود خلاء در لولهی کلکتور اصلاح شده که اتلافات حرارتی را شدت می بخشد چشم پوشی کرد.



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 شكل 11 تغییرات دمای متوسط مخزن در مدل اصلاحشده تحت تابش های 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 می گیرد. حال که نحوهی سیر کولاسیون و شرایط محیطی و فیزیکی در هر دو نمونه یکسان است، می توان 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 "شکل10" وجود جریان بازگشتی در مدل اصلاحشده موجب شده است که توزیع دما در مخزن و لوله یکنواخت تر گردد [14]. در واقع بهدلیل وجود ناحیهی ساکن در مدل معمولی، دمای قسمت انتهایی لوله مرتباً افزایش مییابد، بدون آن که در تبادل حرارتی نقشی داشته باشد. این نقص درمدل اصلاحشده کاملا 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 می شود و ضمن از بین رفتن ناحیهی راکد در کف مخزن، توزیع دما در کلکتور اصلاحشده یکنواخت را زکلکتور معمولی می شود (شکل10).

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 مخزنِ مدل اصلاحشده نسبت به تابش خورشید بیش از مدل معمولی میباشد. از اینرو میتوان نتیجه گیری 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 بای پس 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.

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 جاذب در حالتی که شیر قطع و وصل جریان کاملا بسته است، نشان داده شده است. ملاحظه می شود که این بار 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 جاذب و پوشش شفاف در کلکتور اصلاح شده است (در کلکتور اصلاح شده به دلیل باز کردن انتهای لوله، خلاء از بین رفته است) که اتلاف حرارتی از لوله را شدت می بخشد همین موضوع باعث می شود که دمای متوسط آب درون مخزن در مدل افزایش یابد.

3–2– محاسبەي 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 می شوند. اما در روش شبه دینامیکی این کمیتها متغیر در نظر گرفته می شوند [3]. در استانداردهای مربوط به کلکتورهای خورشیدی BOG ISI [18] شرط تعیین راندمان کلکتور، پایداری و اندازه گیری 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 when the valve is closed شكل 13 دماى متوسط آب مخزن در مدل اصلاح شده و معمولى در حالت شير بسته



Fig. 14 The mean temperature of the water in tube in the modified model and typical model when the valve is closed شكل 14 دماى آب درون لوله در مدل اصلاح شده و مدل معمولى در حالت شير بسته

زمانی حداقل 15 دقیقه ی می اشد. اگر شرایط فوق مهیا باشد راندمان کلکتور از رابطهی (8) محاسبه می شود.

$$\eta = \frac{\dot{m}C_{p}(T_{out} - T_{in})}{A_{a}G}$$
(8)

 $A_{\rm a}$ که در آن $T_{\rm out}$ و $T_{\rm iu}$ به ترتیب دمای خروجی و ورودی به کلکتور و $A_{\rm a}$ 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 جاذب برقرار می گردد و در نتیجه تفکیک و اندازه گیری دقیق جریان ممکن نیست. لذا اگر مخزن ذخیره مانند "شکل 15" به عنوان 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 به عنوان انرژی مفید دریافتی کلکتور در نظر گرفته شود.

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

$$\eta = \frac{m_{\text{tank}} C_{\text{p}} \Delta T}{G A_{\text{a}} \Delta t} \tag{9}$$

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:

$$\eta = -a_0 G \left(\frac{T^* - T_a}{G}\right)^2 - a_1 \left(\frac{T^* - T_a}{G}\right) + \eta_0$$
(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 جمع آوری شدهاند، به دست میآیند. دادههای تجربی به صورت نقاط پراکنده با استفاده از رابطهی (9) و 17 میآیند. دادههای زمانی 30 دقیقهای به دست آمده و در "شکل 16 و 17 مشاهده می شوند. 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 راندمانِ آب گرمکن اصلاح شده ارائه میشود:

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



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

شکل15 شماتیکی از تبادل جرم وحرارت بین کلکتور لوله خلاء و مخزن ذخیره

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.13.7



شکل 16 راندمان مدل اصلاح شده



شکل 17 راندمان مدل معمولی

در "شکل 17 و 16" یارامتر کے نمایندہی عبارت $(T^* - T_a)/G$) می باشد. همان طور که از شکل معادله پیداست وقتی که پارامتر ζ به سمت صفر میل می کند (اختلاف دمای محیط و آب درون کلکتور صفر می شود) به دلیل نبود اتلافات حرارتي راندمان بيشينه و معادل 77 درصد مي باشد.

با توجه به "شكل 17"، رابطهي (12) جهت محاسبهي راندمان آب گرمكن معمولی ارائه میشود:

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

در آبگرمکن معمولی راندمان در حالت بیشینه 66 درصد میباشد. همان طور که از روابط (11 و 12) پيداست راندمان کلکتور اصلاح شده مىتواند تا 11 درصد بيشتر از راندمان كلكتور معمولى باشد. اما دو عامل موجب می شود که با افزایش کمیّت (۵) راندمان مدل اصلاح شده کاهش یابد و به راندمان مدل معمولی نزدیک شود:

- a) تابش خورشید: همان طور که پیشتر اشاره شد کلکتور اصلاح شده حسّاسیت بیشتری نسبت به تابش خورشید دارد و در تابشهای پایین (ساعات ابتدایی و انتهایی روز) راندمانی در حد کلکتور معمولی دارد.
- b) 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.

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. علی رغم 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 می توان اینچنین نتیجه گیری کرد که کلکتور مدل اصلاح شده عملکرد حرارتی مناسبتری از مدل معمولی دارد.

محمد جوزی و همکاران

با توجه به این که با افزایش نسبت ابعادی لوله های خلاء طول ناحیه ی ساکن افزایش می یابد انتظار می رود در طول های بیشتر نمونه ی 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 علايم

$A_{\rm C}$	سطح گردآورنده (m ²)
A_{a}	سطح جذب (m ²)
CP	ظرفیت گرمایی ویژه آب در فشار ثابت (J/kg ° C)
G	شدت تابش موجود بر روی سطح کلکتور (W/m²)
$G_{ m tot}$	کل تابش روی لوله (W)
Gr	عدد گراشف
Ι	شدت تابش خورشیدی (W/m²)
ṁ	دبی جرمی سیال (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
$Q_{ m U}$	انرژی گرمایی مفید قابل برداشت(W)
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رينولدز
T^*	دمای معیار (متوسط دمای سیال در ابتدا و انتهای بازه
	زمانی) (C [°])
$T_{\rm a}$	دمای محیط (C°)
$T_{ m f,i}$	دمای ورودی سیال (C [°])
T f, o	دمای خروجی سیال (C°)
$T_{ m m}$	دمای متوسط آب درون مخزن (C°)
$T_{\rm m,t}$	دمای متوسط آب درون لوله (C°)
UPETSC	گردآورندههای خورشیدی لوله خلاء (U) شکل
WGETSC	گردآورندههای خورشیدی لوله خلاء ترموسیفونی
علايم يوناني	

حيط به تابش خالص روى لوله (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

61

- [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. Scalon, A. Padilha, Analise numérica de coletor solar com tubo evacuad, 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 (فارسى))
- [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 Energ*, 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.