



بهینه سازی راندمان آبگرمکن خورشیدی فتوولتائیک / حرارتی

علیرضا رئوف پناه^{۱*}، محمد رضا صارمی طهرانی^۲

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام شهرری، تهران
۲- دانشجوی دکتری مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام شهرری، تهران

*raoufpanah@iausr.ac.ir

ارسال: فروردین ۹۷ پذیرش: اردیبهشت ۹۷

چکیده

راندمان یک مدل خانگی آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با دو کلکتور صفحه تخت و یک مخزن ذخیره دو جداره با ظرفیت ۲۰۰ لیتر، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آب و گلایکول (ضد یخ) به عنوان سیال عامل در آب گرم کن مذکور به صورت ترموسیفون و با جابجایی آزاد به گردش در آمده و موجب افزایش دمای آب مصرفی می شود. آب مصرفی در طول مدت زمان آزمایش تخلیه نشده است. دماهای سیال عامل ورودی و خروجی کلکتورها، دمای آب شهر، دماهای آب مصرفی در نقاط مختلف داخل مخزن ذخیره و دمای محیط برای روزهای آفتابی و ابری در فصل پاییز در شهر تهران اندازه گیری و دبی جریان ترموسیفون، انرژی حرارتی آب مصرفی و راندمان کل آبگرمکن مذکور محاسبه شده و نمودارهای مربوطه نسبت به زمان ارائه شده اند. نتایج نشان می دهند که بالاترین دمای آب مصرفی در روزهای آفتابی فصل پاییز برابر ۶۰ درجه سانتی گراد و در روزهای ابری برابر ۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. میزان راندمان کل آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون به طور متوسط در طول ماه آبان سال ۱۳۹۶ حدود ۴۵ درصد خواهد بود. بالاترین راندمان پنل فتوولتائیک در روزهای آفتابی فصل پاییز ۱۳/۵ درصد و در روزهای ابری ۱۱/۶ درصد می باشد که علت این کاهش راندمان نسبت به شرایط ایده آل، بالا بودن دمای سطح خارجی پنل می باشد.

کلید واژگان: انرژی خورشیدی، سیستم فتوولتائیک، آبگرمکن ترموسیفون، بازده حرارتی.

۱- مقدمه

گرم کردن آب با استفاده از آبگرمکن های خورشیدی، شاید به عنوان آسان ترین و اقتصادی ترین روش باشد. زیرا با داشتن دانش کافی درباره تابش خورشید، به راحتی و به صورت بسیار موثر می توان انرژی خورشید را برای گرم کردن آب مصرفی منازل و حتی کاربردهای صنعتی استفاده نمود. پیشرفت های علمی بر روی آبگرمکن های خورشیدی در دهه های اخیر رشد چشم گیری داشته است. این نوع آبگرمکن ها نه تنها برای کاربردهای خانگی بلکه برای هتل ها، بیمارستان ها، ساختمان های اداری، صنایعی مانند نساجی، کاغذ سازی، صنایع غذایی و حتی گرم کردن آب استخرهای شنا در پاییز و زمستان کاربرد فراوانی پیدا کرده اند. کلاس [۱]، با فرض اینکه تابش خورشیدی تابعی از زمان باشد، مدل ریاضی ساده ای را برای یک سیستم آب گرم کن خورشیدی با جابجایی طبیعی بین گردآورنده و مخزن ذخیره،

بیان کرده است. در مدل وی مصرف آب از مخزن ذخیره صورت نگرفته است. جویتا و جارج [۲]، با توجه به تحلیل‌های کلوس، سیستمی را تحلیل کرده‌اند که شامل ضریب راندمان گردآورنده بوده و در آن شدت تابش خورشید و دماهای محیط به صورت سری فوریه وابسته به زمان در نظر گرفته شده‌اند. آن‌ها با آزمایشاتی که روی سیستم ترموسیفون انجام داده‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش ارتفاع نسبی بین گردآورنده و مخزن ذخیره، آهنگ جریان افزایش یافته و راندمان کاهش می‌یابد. البته راندمان با کاهش مقاومت گردش افزایش می‌یابد. اونگ [۳]، مدل نظری عملکرد یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را با روش حل عددی تحلیل و ارزیابی کرده و مدل خود را با یک نمونه آزمایشگاهی آبگرمکن خورشیدی با کلکتور صفحه تخت صحت سنجی نموده است. او به منظور بررسی گردش آب در سیستم از رنگ استفاده کرده و در آخر نتایج را با هم مقایسه نموده است. موریسون و راناتونگا [۴]، برای نرخ گردش جریان در یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدل نظری را پیش بینی نموده و آن را مقایسه نمودند. هوانگ [۵]، با بیان شدت تابش خورشید به صورت تابع سینوسی وابسته به زمان، مدل نظری برای سیستم‌های آبگرمکن ترموسیفون با صفحات جاذب موازی، به دست آورده است. موریسون و سرفورد [۶]، عملکرد شش آب گرم کن خورشیدی ترموسیفون با ظرفیت‌های خانگی را بررسی نموده و آن‌ها را به لحاظ پیکربندی و مصارف روزانه، مخصوصاً در ساعات اوج مصرف مورد ارزیابی قرار داده‌اند. ایشان اعلام نمودند که سیستم گردش طبیعی در مقایسه با سیستم گردش اجباری، در ساعات اولیه صبح مناسبتر بوده و در غیر ساعات اوج مصرف نیز بازدهی این سیستم تا ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. نورتون و روبرت [۷]، در یک جمع‌آوری اطلاعات، رفتار سیستم آبگرمکن خورشیدی را به لحاظ تجربی و عددی بررسی کرده و روش‌های مختلف و موفق برای شبیه‌سازی سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را ارائه داده‌اند. ایشان همچنین رویکردهای صورت گرفته تا آن زمان در خصوص آبگرمکن‌های خورشیدی غیر مستقیم (مدار بسته) در کشورهای مختلف را نیز گزارش نمودند. راکو و وازه [۸]، یک مدل نظری برای آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون خانگی با در نظر گرفتن یک مبدل حرارتی داخل مخزن ذخیره را به دست آورده و تحلیل و ارزیابی نمودند. ایشان مدل خود را با یک نمونه آزمایشگاهی آبگرمکن خورشیدی صحت سنجی کرده‌اند. یه و چن [۹]، کارایی یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با کلکتورهای صفحه تخت موازی را به هر دو روش عددی و آزمایشگاهی ارزیابی و مقایسه کرده‌اند. ایشان دریافتند که راندمان حرارتی کل سیستم برای کلکتورهای صفحه تخت موازی بیشتر از کلکتورهای لوله‌ای است. هوانگ [۱۰]، عملکرد یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را بر اساس دستورالعمل در استاندارد تایوانی بررسی نموده و راندمان سیستم را بر اساس تابعی از نسبت جرم آب به سطح مقطع کلکتور به دست آورده است. شاریه و شالایی، پارامترها [۱۱]، با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی ترنسیس طراحی یک آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون در دو شهر امان و عقبه کشور اردن را مطالعه نموده و این پارامتر را بهینه کرده‌اند. ایشان دریافتند که با اصلاح پارامترهای طراحی می‌توان کارکرد سیستم را بین ۱۰ درصد تا ۲۵ درصد بهبود داد. کومار و چواوینا [۱۲]، آبگرمکن خورشیدی با سیستم گردش طبیعی در ابعاد و جنس مختلف کلکتور، ظرفیت و مشخصه فنی مختلف مخزن ذخیره را به طور نظری و تجربی مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. ایشان آبگرمکن‌های مذکور را با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی ترنسیس مدل نموده و سیستم را از نظر دما و دبی بررسی کرده‌اند و آن‌ها دریافتند که اولاً دبی آب عبوری از لوله‌های کلکتور بسیار پایین بوده و ثانیاً گرادیان دمای آب در ریزرهای کلکتور بستگی به نرخ عبور جریان ترموسیفون دارد.

زروکی، بومه دین و بوهادف [۱۳]، سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را با شرایط کشور الجزایر مطالعه و به لحاظ تجربی و نظری تحلیل و بررسی نمودند. ایشان پارامترهای جرم سیال، درجه حرارت سیال را در مدل خود مورد بررسی قرار دادند. چانگ، لئو، شن و هوانگ [۱۴]، به منظور اصلاح راندمان‌های اعلام شده در استاندارد تایوانی برای آبگرمکن‌های خورشیدی، عملکرد و راندمان ۱۲ دستگاه آبگرمکن خورشیدی با ظرفیت‌های مختلف (از ۱۰۲ لیتر الی ۴۴۶ لیتر) را بررسی نموده و نتایج و معادله اصلاح شده خود را ارائه کرده‌اند.

جیسانکار، آنانت، تولاسی، چایا و شیبا [۱۵]، یک بررسی کامل و جامع در خصوص آبگرمکن‌های خورشیدی انجام داده‌اند. ایشان آبگرمکن‌های خورشیدی را به لحاظ بازدهی و تعمیر و نگهداری بررسی نموده و تکنیک‌های مختلف برای افزایش بازده حرارتی این آبگرمکن‌ها را با هم مقایسه کرده‌اند. تانگ، چنگ، وو، لی و یو [۱۶]، عملکرد دو سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با مخازن ذخیره افقی و عمودی در طول شب را به لحاظ مدل نظری و روش تجربی بررسی و ارزیابی نموده و نتایج را با هم مقایسه کرده‌اند. ایشان دریافتند که دمای آب

خروجی از مخزن در حالت عمودی کمی بیشتر از حالت افقی می‌باشد. این نتایج برای ارتفاع‌های مختلف مخزن و در ساعات مختلف شب مورد ارزیابی قرار گرفته است.

گادریا و چانیوالا [۱۷]، راندمان کلکتور خورشیدی در یک آبگرمکن خورشیدی را بر اساس تغییر زاویه کلکتور به منظور دستیابی به حداقل تلفات انرژی دریافتی از خورشید بررسی و ارائه نموده‌اند. در راستای مطالعات صورت گرفته، در نظر است عملکرد یک سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با دو کلکتور صفحه تخت و روند افزایش دمای آب مصرف در سطوح مختلف داخل مخزن ذخیره برای روزهای آفتابی و ابری فصل پائیز به لحاظ تجربی (آزمایشگاهی) و در بازه‌های زمانی ۱۲ و ۷۲ ساعته مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و دبی جریان و راندمان کل سیستم به صورت تئوری محاسبه شود. آبگرمکن مذکور، ساخت کشور ایران بوده و آزمایشات نیز در شهر تهران (کشور ایران) و در ماه آبان سال ۱۳۹۶ انجام شده است. آبگرمکن مورد آزمایش از یک مخزن ذخیره افقی دوجداره، دو کلکتور صفحه تخت و لوله‌های رابط تشکیل شده است. گردآورنده‌ها به صورت موازی نصب شده و به علت جلوگیری از یخ زدگی در طول شب، سیال عامل نیز مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول (ضد یخ) در نظر گرفته شده که به صورت جابجایی آزاد (ترموسیفون) در یک سیستم مدار بسته به گردش در می‌آید. در این آبگرمکن، سیال عامل وارد کلکتورها شده و بعد از افزایش دمای ناشی از جذب انرژی خورشیدی توسط کلکتورها و کاهش دانسیته، به سمت بالا حرکت نموده و وارد جداره خارجی مخزن دوجداره می‌شود. از طرفی جداره داخلی مخزن نیز توسط آب شهر (آب مصرفی) پر شده است. به علت اختلاف دمای سیال عامل و آب شهر، گرمای سیال عامل در مخزن به آب شهر منتقل شده و سیال عامل بعد از خنک شدن به علت افزایش دانسیته و نیروی گرانش مجدداً وارد کلکتورها می‌شود. این چرخش در طول روز چندین بار انجام می‌پذیرد.

۱-۱- فهرست علائم اختصاری

جدول ۱ - پارامترهای مورد استفاده در معادلات

واحد	پارامترهای اندازه‌گیری یا محاسبه شده	نماد
°C	حداقل دمای آب مصرفی داخل مخزن	T_{min}
°C	حداکثر دمای آب مصرفی داخل مخزن	T_{max}
°C	دمای میانگین سیال عامل داخل کلکتورها	T_{ave}
°C	دمای محیط	T_{amb}
Kg	جرم کل آب مصرفی داخل مخزن	M
W/K	ضریب افت گرمایی مخزن	U_L
Kg/m^3	دانسیته سیال عامل (مخلوط آب و گلیکول)	D
m^2/s	ویسکوزیته سینماتیکی سیال عامل (مخلوط آب و گلیکول)	θ
$1/C^\circ$	ضریب انبساط حجمی سیال عامل (مخلوط آب و گلیکول)	β
-	ضریب عبور - جذب کلکتور حرارتی	$\alpha\tau$
-	ضریب کارایی کلکتور حرارتی	F'
m^3/hr	دبی حجمی گردش سیال عامل	\dot{m}
W/m^2	شدت تابش خورشید	$I(t)$
Watt	توان دریافتی از خورشید توسط کلکتورها	Q_{in-col}

KJoule	انرژی کل حرارتی آب مصرفی	Q_{out}
Volt	ولتاژ خروجی از پنل فتوولتائیک	V_{pv}
Amp	آمپراژ خروجی از پنل فتوولتائیک	I_{pv}
Watt	توان دریافتی از خورشید توسط پنل فتوولتائیک	Q_{in-pv}
Watt	توان الکتریکی تولید شده توسط پنل فتوولتائیک	Q_{out-pv}
-	راندمان الکتریکی پنل فتوولتائیک	η_{el}
-	راندمان حرارتی آبگرمکن خورشیدی	η_{th}

۲- روابط و فرمول های ریاضی

در این قسمت، انرژی حرارتی منتقل شده به آب مصرفی در آبگرمکن های خورشیدی بررسی شده و معادلات مربوط به دبی جریان ترموسیفون و راندمان کل سیستم ارائه شده است.

۲-۱- دبی جریان ترموسیفون (m)

همان طوری که پیشتر نیز عنوان شد، با توجه به هد فشار پایین و در نتیجه سرعت کم در جریان های ترموسیفون، اندازه گیری دبی در آب گرم کن های خورشیدی ترموسیفون بسیار پیچیده و مشکل است. میزان توان خورشیدی منتقل شده به پنل فتوولتائیک بررسی شده و معادلات توان الکتریکی و راندمان آن ارائه می شوند [۱۸]. دبی جریان ترموسیفون به صورت زیر است [۱۹].

$$\dot{m}^2 = C \left(\frac{D\beta}{C_p\theta} F' [I(\tau\alpha) - U_L(T_n - T_\alpha)] \right) \quad (1)$$

که در آن ضریب ثابت (C) از رابطه (۲) به دست می آید [۲۰].

$$C = \frac{gN\pi A_{col} \left(\frac{L_{col} \sin \alpha}{2} + H \right)}{128L_{col}(1 + \phi)} \quad (2)$$

نسبت ثابت ϕ از رابطه (۳) به دست می آید [۲۱].

$$\phi = N \frac{L_{col}}{L_{swh}} \left(\frac{d_{col}}{d_{swh}} \right)^4 \quad (3)$$

برای به دست آوردن نرخ جریان ناشی از عمل ترموسیفون لازم است دانسیته سیال عامل در نقاط مختلف چرخش جریان در هر لحظه و در دماهای مختلف در نظر گرفته شود. بنابراین دانسیته سیال عامل (D) براساس رابطه (۴) ارائه شده، محاسبه می شود.

$$D = AT_n^2 + BT_n + C \quad (4)$$

که در رابطه فوق ضرایب ثابت A، B و C برای مخلوط آب و ضدیخ عبارتند از:

$$a_1 = -0.06428 \times 10^{-3}$$

$$a_2 = +8.5053 \times 10^{-6}$$

$$a_3 = -6.89 \times 10^{-8}$$

چسبندگی سینماتیکی مخلوط آب و گلاکول (9) نیز بر اساس رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$\theta = 0.0002T_n^2 - 0.0484T_n + 3.084 \quad (5)$$

توان دریافتی از خورشید توسط پنل فتوولتائیک از رابطه (۶) به دست می آید.

$$Q_{in-pv} = A_{pv} \cdot I(t) \quad (6)$$

که در آن A_{pv} سطح موثر پنل فتوولتائیک و $I(t)$ شدت تابش خورشید است. لازم به ذکر است که توان دریافتی، به صورت لحظه‌ای بوده و می‌باید علاوه بر حذف ترم زمان، برای کل روز نیز محاسبه شود. توان الکتریکی (P_{out-pv}) تولید شده توسط پنل فتوولتائیک از رابطه (۷) به دست می آید.

$$P_{out-pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (7)$$

که در آن V_{pv} ولتاژ خروجی از پنل و I_{pv} آمپراژ خروجی از پنل است. راندمان الکتریکی (η_{el}) پنل فتوولتائیک از رابطه (۸) به دست می آید.

$$\eta_{el} = \frac{P_{out-pv}}{Q_{in-pv}} \quad (8)$$

که در آن P_{out-pv} توان الکتریکی تولید شده توسط پنل و Q_{in-pv} توان دریافتی از خورشید توسط پنل است. لازم به ذکر است که اتلافات در لوله‌ها در مقایسه با کلکتورها ناچیز فرض شده و قابل صرف نظر کردن است. انرژی حرارتی آب مصرفی (Q_{out}) در آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون، انرژی کل حرارتی آب مصرفی در طول روز، بر اساس روابط ترمودینامیکی، از رابطه (۹) به دست می آید.

$$Q_{out} = M \cdot C_{p-w} \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (9)$$

لازم به ذکر است که به علت عدم ورود و خروج آب از داخل مخزن ذخیره، انرژی حرارتی بر حسب جرم کل آب داخل مخزن و برای تمام روز، محاسبه شده است. راندمان حرارتی کل سیستم (η_{th}) با یکسان نمودن یکای روابط (۷) و (۹)، راندمان حرارتی آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون در طول روز از رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{out}}{\sum Q_{in-col}} \quad (10)$$

۳- شرح تجهیزات و مراحل آزمایش

برای افزایش راندمان الکتریکی پنل‌های فتوولتائیک می‌باید از افزایش دمای سطح خارجی آن جلوگیری نمود. برای این منظور می‌توان با عبور سیال از اطراف پنل، دمای آن را کاهش داد. در صورت بکارگیری پنل‌های فتوولتائیک / حرارتی در آبگرمکن‌های خورشیدی، سیستم جدیدی با عنوان آبگرمکن خورشیدی فتوولتائیک / حرارتی طراحی و ساخته می‌شود. در این نوع از آبگرمکن‌ها در کنار استفاده از کلکتورهای معمولی، از پنل‌های فتوولتائیک / حرارتی با مایع جاذب نیز استفاده می‌شود. به طوری که مایع در اثر عبور از اطراف سطح پنل، گرم شده و موجب خنک شدن سطح آن می‌شود. همچنین به عنوان پیش گرم برای آب داخل مخزن نیز استفاده می‌گردد. در این سیستم، علاوه بر گرم نمودن آب مصرفی، می‌توان از برق تولید شده نیز استفاده نمود. لازم به ذکر است که فعالیت‌هایی نیز در خصوص بررسی سیستم مذکور، انجام گرفته است. همچنین این سیستم، توسط همین گروه در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری در حال مطالعه و اجرا است تصاویری از آبگرمکن خورشیدی فتوولتائیک / حرارتی فوق‌الذکر نشان داده شده است.



شکل ۱- تصاویری از آبگرمکن خورشیدی فتوولتائیک/ حرارتی

۳-۱- شرح تجهیزات و ادوات اندازه گیری

لیست تجهیزات و ادوات اندازه گیری در این تحقیق در جدول شماره (۲) اشاره شده است:

جدول ۲- لیست تجهیزات و ادوات اندازه گیری

ردیف	شرح	مدل	شرکت سازنده	کشور سازنده	تعداد
۱	آب گرم کن خورشیدی ترموسیفون با دو کلکتور صفحه تخت	T-200	سولارپلار	ایران	۱
۲	پنل فتوولتائیک	STP-280	SUNTECH	سوئد	۱
۳	سولارمتر	TES-1333R	TES	تایوان	۱
۴	دیتالاگر	TM-947SD	LUTRON	تایوان	۵
۵	ترموکوپل	Type K-01	LUTRON	تایوان	۱۷
۶	رطوبت سنج، بارومتر و دماسنج محیطی	MEB-382SD	LUTRON	تایوان	۱
۷	شارژ کنترلر	UNIC B 20	UNIC	چین	۱
۸	لامپ ۲۴ ولت	H3	OSRAM	چین	۱
۹	باتری ۱۲ ولت	80 Amp-Hour	CHEETA	چین	۲
۱۰	آمپر متر	ZILUG-96 X 96	زایلوگ	ایران	۲
۱۱	ولت متر	ZILUG-96 X 96	زایلوگ	ایران	۲

✓ آب گرم کن خورشیدی ترموسیفون با دو کلکتور صفحه تخت

در این تحقیق از یک دستگاه آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون مدل T-۲۰۰ شرکت سولارپلار با اجزای زیر استفاده شده است.

الف) کلکتور صفحه تخت

دو عدد کلکتور صفحه تخت، مونتاژ شده توسط شرکت سولارپلار با مشخصات اشاره شده در جدول شماره (۳) استفاده شده است.

جدول ۳- مشخصات کلکتور صفحه تخت

شرح	خصوصیت
General (معمولی)	مدل
۲۰۰ x ۹۴ x ۹/۵ (سانتی متر)	ابعاد خارجی
۱/۵۲ (مترمربع) / ۱/۶۴ (مترمربع)	سطح جاذب/ سطح رویت
۴۲/۹ (کیلوگرم) در حالت خالی	وزن
ضریب بازتابش حرارتی: ۰/۷ ضریب جذب: ۰/۹۶ عرض صفحه: ۱۴۳ (میلی متر)	

صفحه جاذب (Sunstrip)	ضخامت : ۰/۵ (میلی متر) پایه آلومینیوم و لوله مسی (Al-Cu) با پوشش صفحات منتخب (Selective Surface) روش پوشش صفحه : پاشش یونی در خلاء (Sputtering) ساخت : کشور سوئد
قاب	جنس : AL6063 اکستروود شده ورق پشت : گالوانیزه به ضخامت ۰/۶ (میلی متر) با رنگ استاتیک
عایق حرارتی	نوع : پشم سنگ / ضخامت : پشت کلکتور ۵۰ (میلی متر) دانسیته : ۳۰ (کیلوگرم بر متر مکعب)

(ب) مخزن ذخیره

یک عدد مخزن ذخیره دوجداره، ساخته شده توسط شرکت سولارپلار با مشخصات اشاره شده در جدول شماره (۴) استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات مخزن دوجداره

شرح	خصوصیت
۲۰۰ (لیتر)	ظرفیت
۱۵۰ x ۶۶ (سانتی متر)	ابعاد مخزن
۰ درجه (به صورت افقی)	زاویه با سطح زمین
ورق آهنی ST37 با پوشش گالوانیزه گرم	جنس
۲/۵ (میلی متر)	ضخامت مخزن
ورق آهنی ST14 با پوشش رنگ استاتیک	جنس روکش مخزن
۰/۸ (میلی متر)	ضخامت روکش مخزن
۱۱۰ (کیلوگرم) در حالت خالی	وزن
فوم پلی یورتال تزریقی - دانسیته ۴۰ (کیلوگرم بر متر مکعب) به ضخامت ۵۰ (میلی متر)	عایق بندی
۸ بار ۱۲۰ (psi)	فشار تست مخزن

(ج) سیال عامل

آبگرمکن خورشیدی مورد استفاده دارای سیستم مدار بسته (غیر مستقیم) بوده و در آن از مخلوط آب و گلابکول (ضد یخ) به عنوان سیال عامل استفاده می شود.

(د) سایر اجزا

سایز اجزای آبگرمکن مورد استفاده دارای مشخصات اشاره شده در جدول شماره (۵) هستند.

جدول ۵- مشخصات سایر اجزای آبگرمکن ترموسیفون مدل T-۲۰۰

شرح	خصوصیت
جنس : نبشی فابریک ۴ به ضخامت ۳ (میلی متر) از جنس آهن ST37 پوشش : گالوانیزه گرم اتصال پیچ و مهره ای	پایه
جنس : آهن ST37 و قطر : ۳/۴ اینچ پوشش : گالوانیزه گرم	لوله

در شکل شماره (۲) تصویری از آبگرمکن ترموسیفون مدل T-۲۰۰ شرکت سولارپلار که در این تحقیق استفاده شده، نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویری از پنل فتوولتائیک پلی کریستالین مدل STP280

۲-۳- پنل فتوولتائیک

در این تحقیق از یک عدد پنل فتوولتائیک با مشخصات اشاره شده در شکل شماره (۳) استفاده شده است.

Model Number	STP280-24Vd
Rated Maximum Power (P_{max})	280W
Output Tolerance	0/+5W
Current at Pmax (I_{mp})	7.95A
Voltage at Pmax (V_{mp})	35.2V
Short-Circuit Current (I_{sc})	8.33A
Open-Circuit Voltage (V_{oc})	44.6V
Nominal Operating Cell Temp. (T_{NOCT})	45°C±2°C
Weight	27kg
Dimension	1956×992×50
Maximum System Voltage	1000V
Maximum Series Fuse Rating	20A
Cell Technology	multi-Si
Application Class A	
All technical data at standard test condition AM=1.5 E=1000W/m ² T _c =25°C	

شکل ۳- تصویری از صفحه راهنمای پنل فتوولتائیک

۳-۳- زمان و مکان آزمایشات

آزمایشات طی چندین روز متوالی و در ماه آبان سال ۱۳۹۶ و در شرایط آفتابی و ابری و حتی بارانی انجام شده است و همانطوری که اشاره شده، برخی از پارامترها به صورت شبانه روزی و برخی دیگر از طلوع تا غروب آفتاب اندازه گیری و ثبت شده‌اند. لازم به ذکر است که نتایج آزمایشات به صورت دو بازه ۱۲ و ۷۲ ساعته گزارش شده و علت انتخاب بازه های ۷۲ ساعته، پایداری دمای آب و رسیدن به بالاترین دما در آبگرمکن است. کلیه تجهیزات در پستبام ساختمان دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری، واقع در کشور ایران و شهر تهران (با طول جغرافیایی ۵۲ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی) و به سمت جنوب نصب شده و آزمایشات در مکان فوق الذکر انجام شده‌اند.

۱-۳-۳- شرح آزمایشات

در این تحقیق در نظر است عملکرد دو سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون با دو کلکتور صفحه تخت و سیستم فتوولتائیک به لحاظ تجربی (آزمایشگاهی) مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

✓ مراحل انجام کار به شرح زیر است:

۱. نصب و مونتاژ سیستم: در ابتدا سیستم آبگرمکن مذکور که شامل یک مخزن ذخیره دوجداره، دو کلکتور صفحه تخت، لوله و اتصالات مربوطه است، مونتاژ و بر روی پایه آن سوار می‌شوند. با توجه به موقعیت شهر تهران، سوی (جهت) قرارگیری و نصب کلکتورهای دستگاه آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون به سمت جنوب و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق است.
۲. نصب ترموکوپل‌ها: در این مرحله ترموکوپل‌ها در محل‌های مورد نظر نصب و آب بندی شده و سپس به دیتالاگرها متصل می‌شوند.
۳. راه اندازی سیستم: در این مرحله آب و گلایکول از محل منبع انبساط بالای مخزن در کلکتورها تزریق شده و سیستم هواگیری می‌شود. لازم به ذکر است که بر اساس کاتالوگ شرکت سولارپلار، در آبگرمکن ترموسیفون ۲۰۰ T- حجم جداره خارجی ۲۱ لیتر بوده و نیاز به ۷ لیتر گلایکول و ۱۴ لیتر آب می‌باشد. سپس آب مصرفی نیز وارد مخزن می‌شود. پس از هواگیری سیستم و پر شدن مخزن از آب شهر (به ظرفیت ۲۰۰ لیتر)، شیرهای ورودی و خروجی آن بسته شده و سیستم آماده آزمایش خواهد بود.
۴. تست گیری: کلیه دیتالاگرها، سولارمتر و دماسنج محیطی از طلوع آفتاب شروع به کار نموده و طی چند روز متوالی و به صورت شبانه روزی اقدام به ثبت اطلاعات می‌نمایند.
۵. سیستم گردش آب: در آبگرمکن مذکور ابتدا آب و گلایکول به عنوان سیال عامل در داخل کلکتورها جمع شده و با تابش خورشید و افزایش دمای کلکتورها، این گرما به سیال عامل منتقل شده و به علت اختلاف دانسیته و سبک شدن، به سمت بالا و جداره خارجی مخزن حرکت نموده و با جابجایی آزاد به گردش در می‌آید. سیال داغ وارد جداره خارجی مخزن شده و موجب گرم شدن آب مصرفی در داخل مخزن می‌شود. به این ترتیب آب مصرفی نیز گرم شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در بازه‌های مورد نظر و در زمان آزمایش، ورود و خروج آب شهر (آب مصرفی) از مخزن ذخیره وجود نداشته است.

۴- راندمان حرارتی سیستم آب گرم کن خورشیدی

راندمان حرارتی سیستم آبگرمکن خورشیدی بر اساس روابط اشاره شده در قسمت قبل بیان می‌شود. به علت عدم ورود و خروج آب از مخزن ذخیره، راندمان حرارتی برای کل روز محاسبه شده و در این قسمت به تفسیر آن برای تمام روزهای آبان سال ۱۳۹۶ پرداخته شده است.

جدول ۶- نمودار راندمان حرارتی برای آبان ۱۳۹۶

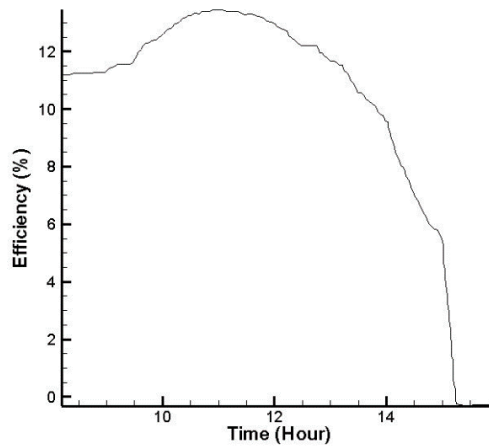
تاریخ	شرایط هوا	مقدار
۹۶/۸/۴	آفتابی	۵۸/۴
۹۶/۸/۵	آفتابی	۵۰/۳
۹۶/۸/۶	آفتابی	۵۵/۱
۹۶/۸/۸	آفتابی و تا قسمتی ابری	۴۵/۸
۹۶/۸/۸	نیمه ابری	۳۵/۳
۹۶/۸/۹	آفتابی	۴۵/۰
۹۶/۸/۱۰	آفتابی و تا قسمتی ابری	۳۸/۶
۹۶/۸/۱۱	آفتابی	۳۴/۳
۹۶/۸/۱۲	آفتابی	۳۱/۶
۹۶/۸/۱۳	آفتابی و نیمه ابری	۳۱/۸
۹۶/۸/۱۴	آفتابی	۵۹/۴
۹۶/۸/۱۵	آفتابی	۵۵/۲
۹۶/۸/۱۶	آفتابی	۵۳/۹
۹۶/۸/۱۸	آفتابی	۴۸/۶

۴۵/۰	نیمه ابری	۹۶/۸/۱۸
۴۲/۴	نیمه ابری	۹۶/۸/۱۹
۴۵/۶	نیمه ابری	۹۶/۸/۲۰
۴۱/۱	آفتابی	۹۶/۸/۲۱
۳۶/۲	نیمه ابری	۹۶/۸/۲۲
۴۶/۱	ابری و تا حدودی بارندگی	۹۶/۸/۲۳
۵۳/۶	آفتابی	۹۶/۸/۲۴
۴۹/۸	آفتابی و تا قسمتی ابری	۹۶/۸/۲۵
۴۵/۸	نیمه ابری	۹۶/۸/۲۶
۵۲/۱	ابری و تا حدودی بارندگی	۹۶/۸/۲۸
۳۶/۰	بارانی	۹۶/۸/۲۸
۳۴/۳	بارانی	۹۶/۸/۲۹
۴۵/۹	ابری تا حدودی بارندگی	۹۶/۸/۳۰

همان طوری که مشاهده می‌شود، در ماه آبان سال ۱۳۹۶، به علت شرایط ابری و بارانی در اکثر روزها و همچنین مقدار کم شدت تابش خورشید، راندمان کل آبگرمکن خورشیدی، در اکثر روزها، بین ۳۰ الی ۵۰ درصد بوده و در بعضی از روزهای آفتابی تا مرز ۶۰ درصد نیز رسیده است. در نتیجه نمی‌توان از این سیستم انتظار گرمایش مناسب برای تمامی روزهای فصل پاییز و زمستان را داشت. راندمان سیستم در بازه های ۱۲ ساعته بیشتر از راندمان متوسط آن در بازه های ۷۲ ساعته است. زیرا در بازه های ۷۲ ساعته به علت عدم ورود و خروج آب مصرفی داخل مخزن، تعادل گرمایی آب در داخل آن و جلوگیری از اتلاف حرارتی با استفاده از عایق، گرادیان دمای آب در داخل مخزن پایین می‌باشد، همچنین به علت شرایط ابری و بارانی در اکثر روزها و مقدار کم شدت تابش خورشید، سیستم توانایی افزایش دمای آب داخل مخزن به میزان قابل توجه را ندارد. بنابراین راندمان کل آبگرمکن خورشیدی، در بازه های ۷۲ ساعته کمتر از بازه های ۱۲ ساعته می‌باشد. در حالی که در بازه های ۷۲ ساعته، به علت انباشت آب در داخل مخزن و ذخیره نمودن انرژی روزهای گذشته، حداکثر مقدار دمای آب داخل مخزن ذخیره، نسبت به بازه های ۱۲ ساعته بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است که میانگین راندمان حرارتی آبگرمکن مذکور در آبان ماه سال ۱۳۹۶ حدود ۴۵ درصد است.

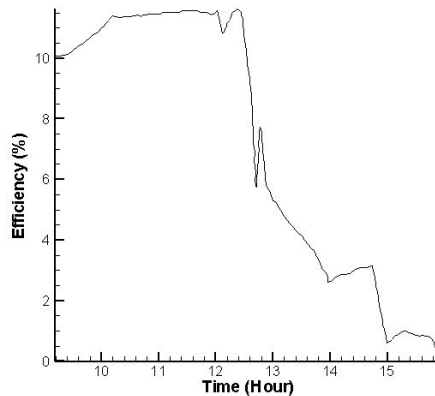
۵- ارزیابی و تحلیل داده ها

راندمان الکتریکی پنل فتوولتائیک بر اساس روابط اشاره شده در قسمت قبل محاسبه شده است. با افزایش شدت تابش خورشید، به علت افزایش انرژی فوتون ها و شارش الکترون ها و در نتیجه تولید اختلاف پتانسیل، راندمان پنل نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که بررسی تغییرات راندمان الکتریکی نسبت به زمان و از ساعت ۶ الی ۱۸ به صورت کلی بوده و برای روز خاصی مدنظر نیست، بنابراین در این قسمت به ترسیم نمودار مربوطه و تفسیر آن برای روزهای آفتابی و ابری پرداخته شده است. در نمودار شکل (۴) تغییرات راندمان الکتریکی (بر حسب درصد) نسبت به زمان (بر حسب ساعت) برای یک روز آفتابی نشان داده شده است.



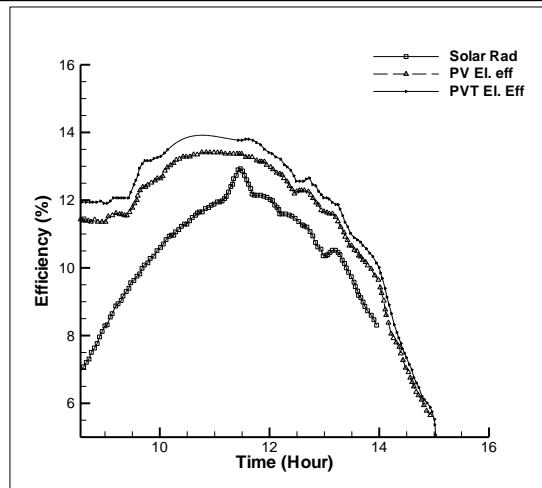
شکل ۴- نمودار راندمان الکتریکی به زمان برای روز آفتابی

همان طوری که از نمودار شکل (۴) مشاهده می‌شود، با افزایش شدت تابش خورشید، راندمان پنل فتوولتائیک نیز به علت افزایش توان تولیدی، افزایش می‌یابد. در طول روز و هم زمان با پایین آمدن آفتاب و کاهش شدت تابش خورشید، راندمان نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که به علت افزایش دمای سطح خارجی پنل، راندمان الکتریکی پنل کم و حداکثر تا ۱۳/۵ درصد است. در نمودار شکل (۵) تغییرات راندمان الکتریکی (بر حسب درصد) نسبت به زمان (بر حسب ساعت) برای یک روز ابری نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار راندمان الکتریکی به زمان برای روز ابری

همان طوری که از نمودار شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش شدت تابش خورشید، راندمان پنل فتوولتائیک به علت افزایش توان تولیدی، افزایش می‌یابد. در طول روز و هم زمان با پایین آمدن آفتاب و کاهش شدت تابش خورشید، راندمان نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که به علت افزایش دمای سطح خارجی پنل، راندمان الکتریکی پنل کم و حداکثر تا ۱۱/۶ درصد است. همچنین با ایجاد نوسان در شدت تابش خورشید، راندمان نیز دارای نوساناتی است. به طوری که در طول روز ابری این نوسانات، شدید است. در نمودار شکل شماره (۶) تغییرات راندمان پنل فتوولتائیک / حرارتی و شدت تابش خورشید نسبت به زمان برای یک روز آفتابی نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار راندمان پنل فتوولتائیک / حرارتی و تابش خورشید به زمان برای یک روز آفتابی

همان طوری که از نمودار شکل شماره (۶) مشاهده می شود، در صورت استفاده از پنل به جای کلکتور اول در آبگرمکن خورشیدی و عبور سیال از اطراف پنل دمای سطح آن کاهش یافته و در نتیجه بر اساس روابط و موارد بیان شده در قسمت های قبل می توان در بهترین حالت فرض نمود که با افزایش توان خروجی از پنل، راندمان آن نیز در شرایط شدت تابش یکسان افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که بر اساس بروشور سازنده، راندمان اسمی پنل در شرایط ایده آل (یعنی شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و دمای سطح ۲۵ درجه سانتی گراد) ۱۴/۴٪ است که با کاهش دمای سطح پنل و افزایش توان تولیدی در این روش می توان، راندمان پنل را تا حد ۱۴٪ افزایش داد.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

تجزیه و تحلیل داده های اندازه گیری شده نشان می دهد:

بیشترین جذب انرژی خورشید در کلکتورها در محدوده ظهر (فواصل ساعات ۱۲ الی ۱۴) اتفاق می افتد که در نتیجه سیال خروجی از کلکتور در این بازه زمانی حداکثر مقدار درجه حرارت خود را دارد. در طول روز و در ساعات قبل از ظهر، با افزایش شدت تابش خورشید، دبی جریان ترموسیفون نیز افزایش یافته و در ساعات بین ۱۲ تا ۱۴ به علت حداکثر میزان شدت تابش و همچنین حداکثر گرادیان دما به اوج خود می رسد و در ساعات بعد از ظهر با کاهش میزان شدت تابش، دبی نیز با روند سریع تری نسبت به قبل از ظهر، کاهش می یابد. همچنین در این تحقیق فرض شده که پنل فتوولتائیک / حرارتی جایگزین اولین کلکتور در آبگرمکن خورشیدی شده و به علت عبور سیال از اطراف پنل، علاوه بر کاهش دمای سطح آن، به عنوان پیش گرم نیز استفاده شود. تجزیه و تحلیل داده های اندازه گیری شده نشان می دهد: در صورت استفاده از پنل به جای کلکتور اول در آب گرم کن خورشیدی و عبور سیال از اطراف پنل، دمای سطح آن کاهش یافته و در نتیجه می توان در بهترین حالت فرض نمود که با افزایش توان خروجی از پنل، راندمان آن نیز در شرایط شدت تابش یکسان، افزایش خواهد یافت. لازم به ذکر است که بر اساس بروشور سازنده، راندمان اسمی پنل در شرایط ایده آل (یعنی شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و دمای سطح ۲۵ درجه سانتی گراد) ۱۴/۴ درصد است که با کاهش دمای سطح پنل و افزایش توان تولیدی در این روش می توان راندمان پنل را تا حد ۱۴ درصد افزایش داد.

۷- مراجع

1. D.J. Close, "The Performance of Solar Water Heaters with Natural Circulation", Solar Energy, Vol. 6, pp 30-40, 1962.
2. G.L. Gupta, H. P. Garg, "System Design In Solar Water Heater with Natural Circulation", Solar Energy, Vol.12, pp 163-182, 1968.

3. K.S. Ong, "A Finite-Difference Method To Evaluate The Thermal Performance of A Solar Water Heater", Solar Energy, Vol.16, pp 137-147, 1974.
4. G.L. Morrison, and, D.B.J. Ranatunga, "Thermosyphon Circulation In Solar Collectors", Solar Energy, Vol. 24, pp 191-198, 1980.
5. B.J. Huang, "Similarly Theory Of Solar Water Heater With Natural Circulation", Solar Energy, Vol. 25, pp 106-116, 1980.
6. G.L. Morrison, C.M. Safford, "Long Term Performance Of Thermosyphon Solar Water Heaters", Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp 341-350, 1983.
7. B. Norton, S.D. Probert, "Recent Advances In Natural-Circulation, Solar-Energy Water Heater Designs", Applied Energy, Vol. 15, pp 15-42, 1983.
8. C.D. Rakopoulos, E. Vazeos, "A Theoretical And Experimental Investigation Of Thermosyphon Solar Domestic Water Heaters, With Indirect Heating, Under Hot Water Withdrawal Conditions", Energy Conversion and Management, Vol. 26, No. 1, pp 95-101, 1986.
9. Ho.Yeh. Ming, L.C. Chen, "A Study On Thermosyphon Soalr Water Heater With Parallel Flat-Plat Collector", Solar Energy, Vol. 11, No. 6, pp 579-588, 1986.
10. B.J. Huang, "Performance Rating Method Of Thermosyphon Soalr Water Heaters", Solar Energy, Vol. 50, No. 5, pp 435-440, 1993.
11. A. Shariah, B. Shalabi, "Technical Note, Optimal Design For A Thermosyphon Solar Water Heater", Renewable Energy, Vol. 11, No. 3, pp 351-361, 1997.
12. K. Chuawittayawuth, S. Kumar, "Experimental Investigation Of Temperature And Flow Distribution In A Thermosyphon Solar Water Heating System", Renewable Energy, Vol. 26, pp 431-448, 2002.
13. A. Zerrouki, A. Boumediene, K. Bouhadeif, "The Natural Circulation Solar Water Heater Model With Linear Temperature Distribution", Renewable Energy, Vol. 26, pp 549-559, 2002.
14. J.M. Chang, J.S. Leu, M.C. Shen, B.J. Huang, "A Prposed Modified Efficiency For Thermosyphon Solar Heating Systems", Solar Energy, Vol. 76, pp 693-701, 2004.
15. S. Jaisankar, T.K. Radhakrishnan, K.N. Sheeba, "Experimental Studies On Heat Transfer And Friction Factor Characteristics Of Thermosyphon Solar Water Heater System Fitted With Spacer At The Trailing Edge Of Twisted Tapes", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp 1224-1231, 2009.
16. R.Tang, Y. Chen, M. Wu, Z. Li, Y. Yu, "Experimental And Modeling Studies On Thermosiphon Domestic Solar Water Heaters With Flat-Plate Collectors At Clear Nights", Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp 2548-2556, 2010.
17. M.K. Bhatt, S.N. Gaderia, S.A. Channiwala, "Experimental Investigations On Top Loss CoEfficients", Solar Energy, Vol. 18, pp 113-121, 2011.
18. M. Lämmle, T. Kroyer, S. Fortuin, , M. Wiese, M. Hermann, " Development and modelling of highly-efficient PVT collectors with low emissivity coatings", Solar Energy, pp 161-173. 2016.
19. JJ. Michael, S. Iniyar, G. Ranko, "Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: a reference guide", Renew Sustain Energy Rev. 51, pp 62-88, 2015.
20. A.M. Elbreki, M.A. Alghoul, A.N. Al-Shamani, A.A. Ammar, B. Yegani, A.M. Aboghrara, M.H. Rusaln, K. Sopian, "The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: a critical reviwie. Renew". Sustain Energy Rev. 57, pp 602-647, 2016.
21. M. Herrando, C. N. Markides, K. Hellgardt, " A UK -based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance". Applied Energy ,Vol. 12, pp 288-309, 2014.

Optimization of Photovoltaic / Thermal Solar Water Heater Efficiency

Alireza Raouf Panah^{1*}, Mohammad Reza Saremi Tehrani²

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Yadgar Imam Shahre rey, Tehran, Iran

2-Phd Student of Mechanical Engineering, Yadgar Imam Shahre rey, Islamic Azad University., Tehran, Iran

* raoufpanah@iausr.ac.ir

Abstract

The efficiency of a household thermostat solar water heater model with two flat panel collectors and a double-glazed storage tank of 200 liters capacity was investigated experimentally. Water and glycol (antifreeze) are used as operating fluid in the water heater to be transformed into thermosyphon with free movement and increase the temperature of consumed water. Water is not discharged during the test period. Flow temperatures of collector input and output, city water temperature, water temperatures at different points in the reservoir and ambient temperature for sunny days in the autumn in Tehran. Measurement and flow rate of the thermosyphon, thermal energy of the water consumed and total water efficiency The aforementioned heater has been calculated and the corresponding graphs are given over time. The results show that the highest water temperature is 60 ° C on sunny days and 50 ° C on cloudy days. The overall efficiency of the thermostat solar thermal heater will be around 45 درصد during the month of November 1396. The highest photovoltaic panel efficiency in the sunny days is 13.5% in the autumn and 11.6% in the cloudy days, which is due to the decrease in efficiency compared to the ideal conditions. The surface temperature of the panel is high.

Keyword: Solar energy, photovoltaic system, Thermosyphon heater, thermal efficiency