

# ساخت سیستم فتوولتائیک/حرارتی با بکارگیری لوله‌های گرمایی از نوع ترموسیفون

میثم مرادقلی<sup>۱</sup>، سیدمصطفی نوعی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۲/۴

چکیده:

در کنار سیستم‌های فتوولتائیک که انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند، سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی قابلیت تولید همزمان برق و گرما را دارند. در این تحقیق، یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شده که از ترموسیفون‌هایی (لوله‌های گرمایی بدون فتیله) برای خنک کردن پانل فتوولتائیک در آن استفاده شده است. مтанول با توجه به فشار بخار مناسب در بازه دمایی آزمایش‌ها به عنوان سیال عامل ترموسیفون‌ها به کار گرفته شد. نسبت پر شدن سیال عامل، به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر عملکرد ترموسیفون، در آزمایش‌ها در مقادیر مختلف این پارامتر صورت گرفت. در بهترین نسبت پر شدن ۵۰ درصد در طول مدت آزمایش سیستم فتوولتائیک/حرارتی به طور متوسط ۵/۶۷ درصد توان بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تولید نمود. همچنین سیستم فتوولتائیک/حرارتی به طور متوسط ۱۶/۳۵ درصد راندمان حرارتی تولید نمود.

کلمات کلیدی:

سیستم فتوولتائیک/حرارتی، ترموسیفون، نسبت پرشدن، خنک کردن پانل فتوولتائیک

## مقدمه

انرژی خورشیدی یکی از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. کاربردهای عمدۀ انرژی خورشیدی به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: سیستم‌های گرما خورشیدی و سیستم‌های فتوولتائیک.<sup>۱</sup> سیستم‌های گرما خورشیدی انرژی تابشی خورشید را به انرژی گرمایی و سیستم‌های فتوولتائیک انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌ها، حمل و نقل، دستگاه‌های مستقل (مانند ماشین حساب‌ها)، کشاورزی (پمپ آب)، روشنایی خیابان‌ها و تولید هیدروژن کاربرد دارند [۳و۸]. اصلی ترین بخش سیستم‌های فتوولتائیک، پانل‌ها هستند که متشکل از سلول‌های خورشیدی، می‌باشند. پانل فتوولتائیک ۷ تا ۲۲ درصد انرژی نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۲]. در سلول‌های خورشیدی بیشتر تابش خورشید به گرما تبدیل می‌شود که منجر به بالا رفتن دمای سلول‌ها و در نتیجه، کاهش راندمان الکتریکی پانل، به دلیل افت ولتاژ می‌شود. ونگ<sup>۲</sup> و همکاران [۹]، نشان دادند که افزایش دما به میزان یک کلوین باعث کاهش راندمان الکتریکی به میزان ۰/۵ تا ۰/۲ درصد می‌شود. علاوه بر این، افزایش دما در دراز مدت طول عمر سلول‌ها را کوتاه می‌کند. بنابراین، خنک کردن سلول‌های خورشیدی پانل‌های فتوولتائیک اهمیت اساسی دارد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شده، از ترموسیفون‌ها برای خنک کردن پانل فتوولتائیک استفاده شده است. ترموسیفون‌ها یکی از انواع لوله‌های گرمایی می‌باشند که از بخش‌های تبخیر کننده، آدیباتیک و چگالنده تشکیل شده‌اند. ترموسیفون دوفازی بسته، یک لوله گرمایی بدون نیاز به فتیله بوده که در آن برای بازگشت میانات سیال عامل از بخش چگالنده به بخش تبخیر کننده از گرانش کمک گرفته می‌شود. به همین دلیل در ترموسیفون‌ها بخش چگالنده باید بالاتر از بخش تبخیر کننده قرار گیرد. ترموسیفون دوفازی بسته، یک وسیله انتقال گرما با کارایی بالا بوده که توسط آن انتقال مقدار زیادی گرما با سرعت بالا در یک اختلاف دمایی کم، امکان پذیر است [۷].

## شرح دستگاه و آزمایش

در سیستم فتوولتائیک/حرارتی، ترموسیفون‌ها پشت پانل قرار گرفتند و یک فاصله بین ترموسیفون‌ها، در وسط پانل قرار داده شد تا دمای پشت پانل اندازه‌گیری شود.

مشخصات پانل بکار رفته در سیستم فتوولتائیک/حرارتی در شرایط استاندارد (تابش  $\frac{W}{m^2}$  ۱۰۰۰ و دمای  $25^\circ C$ ) در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که سلول‌های خورشیدی پانل فتوولتائیک از نوع سیلیکونی تک کریستالی می‌باشند.

1) Photovoltaic

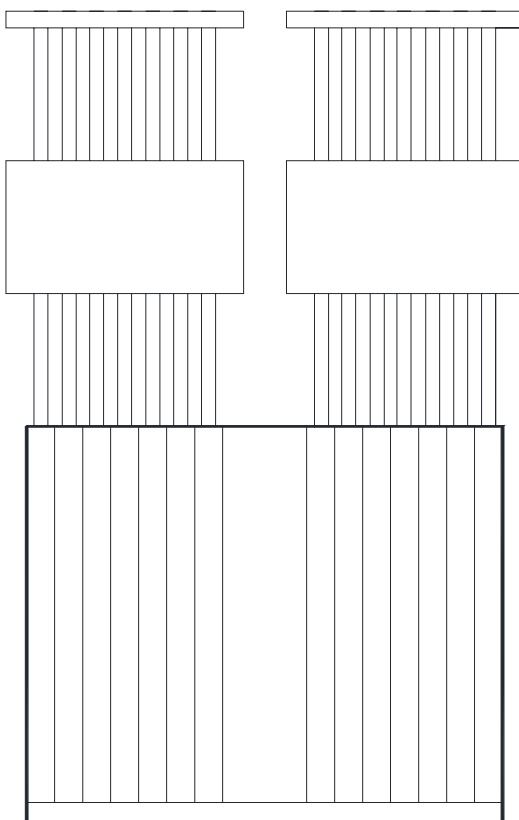
2) Weng

جدول (۱) مشخصات پانل فتوولتائیک

مقدار	خصوصیت پانل
0.797 A	جریان بیشینه
25.1 V	ولتاژ بیشینه
20 W	توان بیشینه
$m = 0.003$	مساحت هر سلول
48	تعداد سلول ها
13.88	راندمان

طول بخش تبخیر کننده ترموسیفون ها ۳۵ سانتی متر بوده و از شمش های آلومینیومی با مقطع مربعی ساخته شد که مجرایی گرد با قطر داخلی ۸ میلی متر درون آن ایجاد شد. تبخیر کننده ها در قسمت انتهایی خود به یک هدر<sup>۱</sup> به قطر داخلی ۸ میلی متر متصل شدند. بخش های آدیاباتیک و چگالنده ترموسیفون ها هم از لوله های آلومینیومی به قطر داخلی ۸ میلی متر ساخته شده و به تبخیر کننده ها متصل شدند. طول بخش آدیاباتیک ترموسیفون ها ۱۳ سانتی متر و طول بخش چگالنده آنها ۱۰ سانتی متر می باشد. برای سرد کردن سیال عامل درون ترموسیفونها از گردش آب درون دو عدد محفظه آلومینیومی دو لیتری در قسمت چگالنده ترموسیفون ها استفاده شد. ترموسیفون ها در قسمت فوقانی هم توسط دو هدر به قطر داخلی ۸ میلی متر به یکدیگر متصل شدند. در دو طرف هدرها، شیری برای ایجاد خلا<sup>۲</sup> و همچنین ورود و خروج سیال عامل در نظر گرفته شده است. از یک فشارسنج جهت اندازه گیری فشار درون ترموسیفون ها استفاده شد که محدوده اش بین ۱- تا ۳ بار بود. بخش های مختلف ترموسیفون ها کاملاً با پشم شیشه عایق بندی شده تا سیستم هیچ گونه تبادل حرارتی با محیط نداشته باشد. شماتیک سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

1) Header



شکل ۱) شماتیک سیستم فتوولتائیک/حرارتی

آزمایش‌ها در روزهای کاملاً آفتابی فصل بهار سال ۱۳۹۱ و در محوطه پژوهشکده هوا خورشید دانشگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفت. برای انجام آزمایش‌ها، پانل‌های فتوولتائیک کنار یکدیگر روی یک پایه به صورت کاملاً هم سطح قرار داده شدند.

اندازه‌گیری‌ها و داده‌خوانی‌ها در طول انجام آزمایش در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای بین ساعات ۱۲ تا ۱۳ که تابش خورشیدی بیشتر است، انجام شده است.

اطلاعات یادداشت برداری شده به شرح ذیل می‌باشد :

الف- توان خروجی پانل‌ها: یک دستگاه MPPT<sup>۱</sup> با دقت W ۰/۱ جهت اندازه‌گیری توان بیشینه خروجی از پانل‌ها مورد

1) Maximum Power Point Tracking

استفاده قرار گرفت.

ب- میزان تشعشع رسیده به سطح پانل ها: سولاریمتر دستگاه سولار ۳۰۰ پژوهشکده هوا خورشید مشهد جهت اندازه گیری شدت تشعشع خورشید به کار گرفته شد. برای این منظور، سولاریمتر موازی سطح پانل ها قرار گرفت تا دقیقاً تشعشعی که به سطح پانل ها می رسد، اندازه گیری شود.

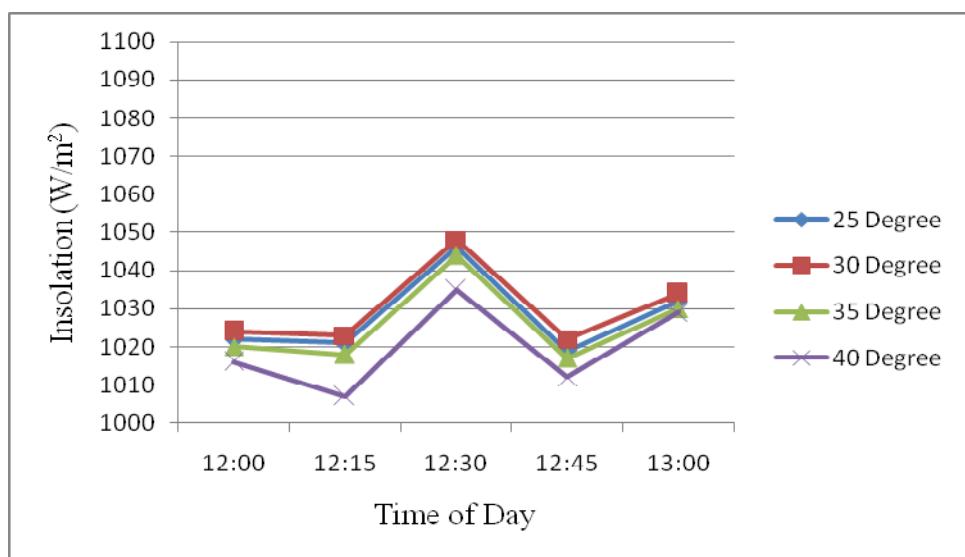
ج- دمای محیط و دمای پانل های فتوولتائیک: برای ثبت دمای پشت پانل های فتوولتائیک از یک ترمومتر لیزری با دقت  $^{+/-} ۰.۱^{\circ}\text{C}$  و برای اندازه گیری دمای محیط هم از سنسور دمایی دستگاه سولار ۳۰۰ استفاده شد.

د- دمای خروجی آب: بدین منظور یک سنسور PT100 با دقت  $^{+/-} ۰.۱^{\circ}\text{C}$  دمای خروجی آب را نشان می داد.

### نحوه انجام آزمایش‌ها

ابتدا زاویه شبیب بهینه برای پانل های فتوولتائیک تعیین شد. مطالعات انجام شده [۴-۶]، بیانگر این مطلب است که زاویه شبیب بهینه در نیمکره شمالی برای پانل های فتوولتائیک رو به جنوب، وابسته به عرض جغرافیایی است. لازم به ذکر است که عرض جغرافیایی شهر مشهد  $۳۶^{\circ}$  درجه و  $۱۷^{\circ}$  دقیقه می باشد.

در این تحقیق، زاویه شبیب بهینه به صورت تجربی تعیین شده و نتایج در شکل (۲) آورده شده است. برای این منظور، پانل ها به طرف جنوب، در زوایای مختلف نسبت به افق قرار گرفتند تا زاویه‌ای که در آن بیشترین تابش دریافت می شود، تعیین گردد.

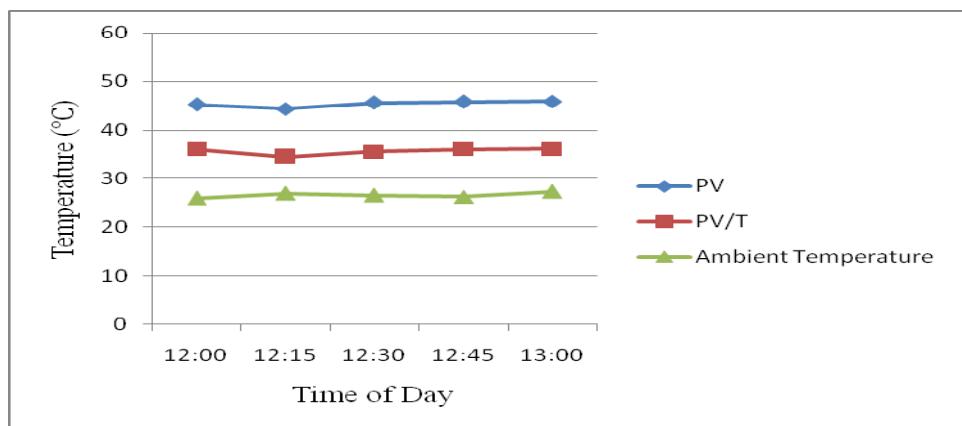


شکل ۲) میزان تابش رسیده به سطح پانل ها در زوایای مختلف

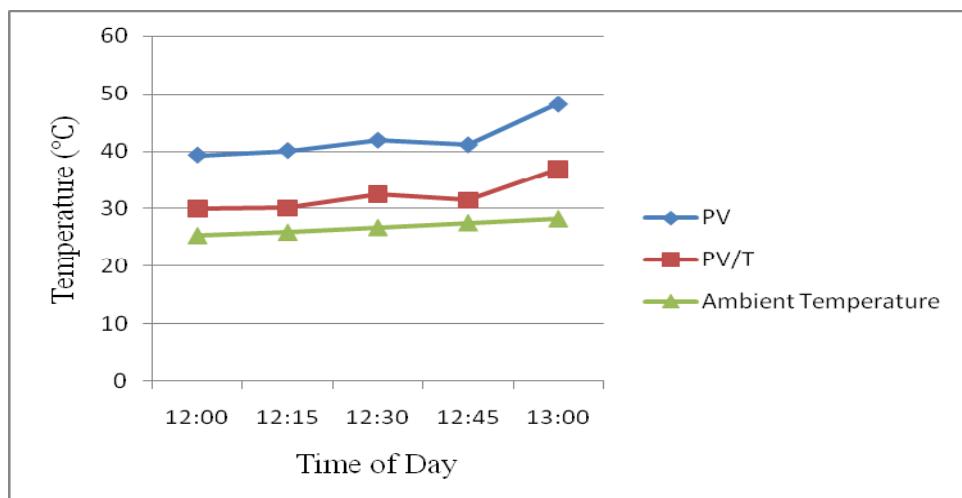
با توجه به شکل (۲)، زاویه‌ای که در آن پانل‌های فتوولتائیک بیشترین تابش را دریافت می‌کنند  $30^{\circ}$  می‌باشد. بنابراین، برای انجام آزمایش‌ها، پانل‌های فتوولتائیک رو به جنوب و تحت این زاویه شب قرار گرفتند.

آزمایش‌ها در شرایط خالص نسبی اولیه برابر  $0/9\text{ bar}$  - انجام گرفتند. پس از ایجاد خالص، مтанول به عنوان سیال عامل در نسبت‌های پرشدن متفاوت درون ترمومویفون‌ها ریخته شد که نتایج در ادامه آورده شده است.

در شکل (۳)، متوسط دمای پشت پانل، در سیستم فتوولتائیک و سیستم فتوولتائیک/حرارتی و تغییرات دمای محیط در مدت زمان آزمایش‌ها برای نسبت‌های پرشدن  $30^{\circ}$  درصد و  $40^{\circ}$  درصد نشان داده شده است.



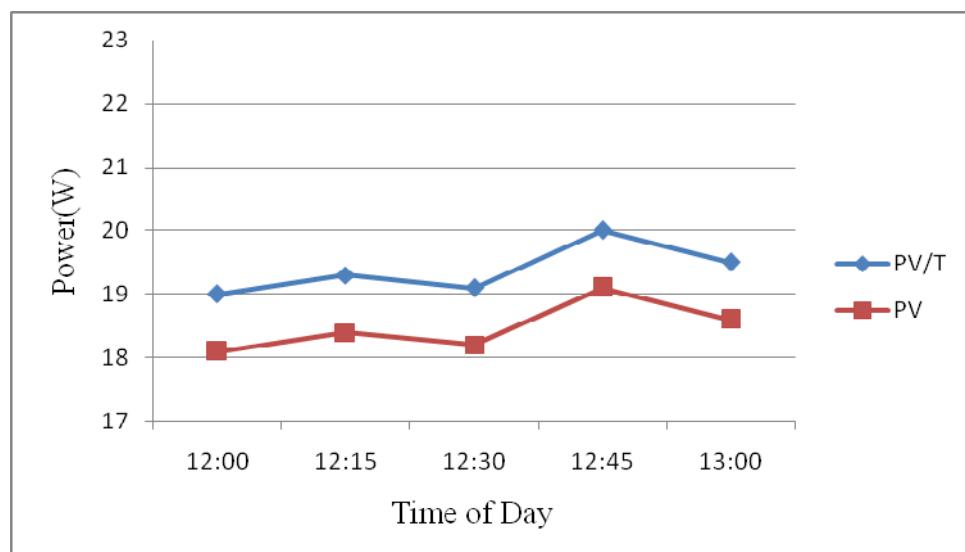
شکل ۳-الف) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پرشدن  $30^{\circ}$  درصد



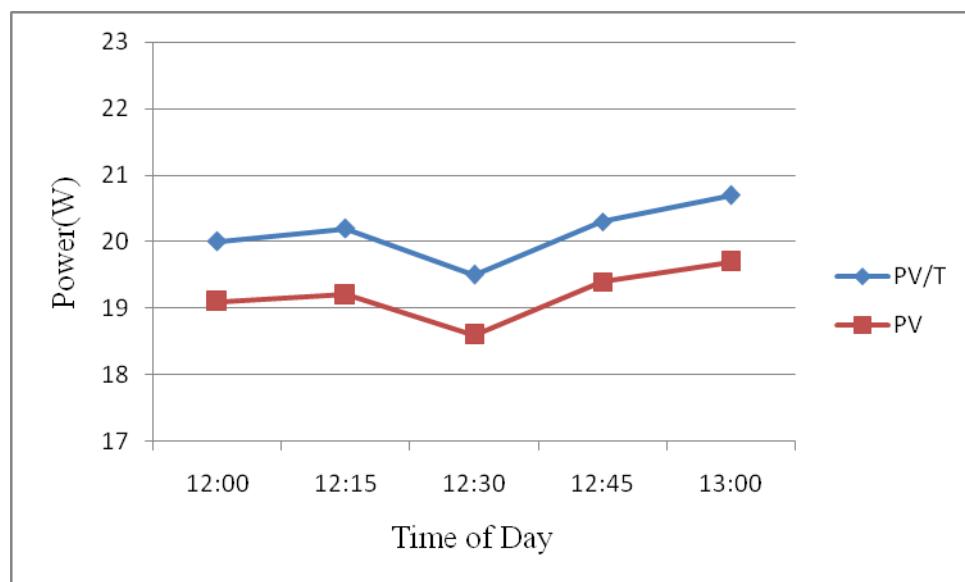
شکل ۳-ب) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پرشدن  $40^{\circ}$  درصد

با توجه به شکل (۳)، در نسبت های پرشدن ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب  $9.9^{\circ}\text{C}$  و  $9.76^{\circ}\text{C}$  دمای پشت پانل در سیستم فتوولتائیک/حرارتی خنک تر از سیستم فتوولتائیک بوده است.

توان خروجی پانل ها در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در شکل های (۴) نشان داده شده است.

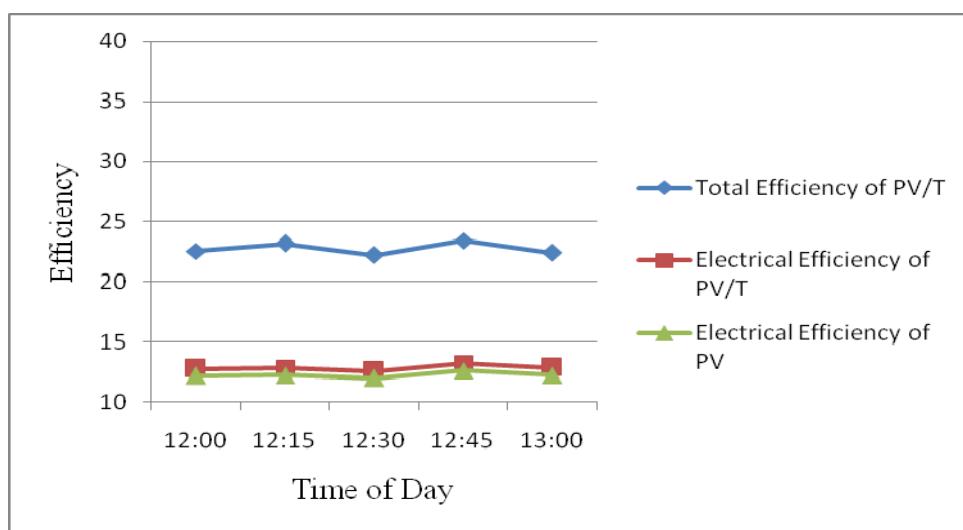


شکل ۴-الف) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پرشدن ۳۰ درصد

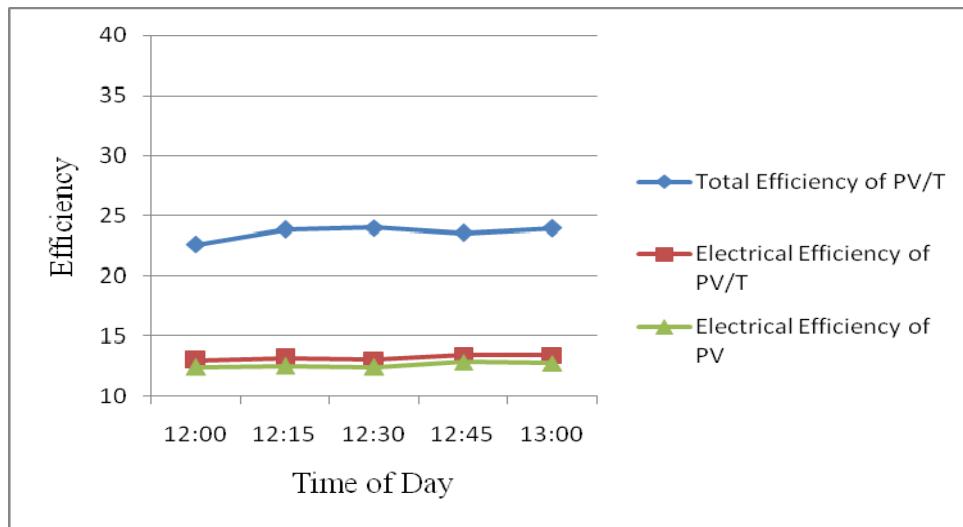


شکل ۴-ب) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پرشدن ۴۰ درصد

خنک کاری پانل در سیستم فتوولتائیک/حرارتی سبب شد تا این سیستم در نسبت پرشدن ۳۰ درصد به طور متوسط و برای ۴۰ درصد،  $W_{PV/T} = 0.94 W$  توان بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تولید نماید. در شکل های (۵)، راندمان الکتریکی سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک و همچنین راندمان کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی برای دو نسبت پرشدن مذکور نشان داده شده است.



شکل ۵-الف) مقایسه راندمان ها در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پرشدن ۳۰ درصد



شکل ۵-ب) مقایسه راندمان ها در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پرشدن ۴۰ درصد

از شکل های (۵) می توان دریافت که در نسبت پر شدن ۳۰ درصد، سیستم فتوولتائیک/حرارتی در مقایسه با سیستم فتوولتائیک به طور متوسط ۶۰ درصد راندمان الکتریکی بیشتری تولید نمود، که این افزایش برای نسبت پر شدن ۴۰ درصد، ۶۲٪ می باشد. همچنین مجموع راندمان تولید شده در سیستم فتوولتائیک/حرارتی به طور متوسط برای نسبت پر شدن ۳۰٪ و ۴۰٪ درصد، به ترتیب ۱۰/۴۹ و ۱۱/۰۳ درصد بیشتر از سیستم فتوولتائیک می باشد.

در شکل های (۵)، راندمان کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی [۱] با توجه به قانون اول ترمودینامیک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\eta_{\text{pvt}} = \eta_{\text{th}} + \xi \eta_{\text{pv}}$$

و راندمان های الکتریکی و حرارتی به ترتیب از روابط زیر محاسبه شدند:

$$\eta_{\text{pv}} = \frac{P_{\text{max}}}{A_{\text{pv}} \cdot I} \times 100$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q}{A_e \cdot J} \times 100$$

که

$$Q = m C_{p,w} (T_{w,0} - T_{e,i})$$

$$\xi = \frac{A_{\text{pv}}}{L_e}$$

$A_e$ : مساحت کلکتور

$A_{\text{pvt}}$ : مساحت سلول های خورشیدی پانل فتوولتائیک

$C_{p,w}$ : گرمای ویژه آب

$I$ : شدت تابش خورشیدی

$m$ : دمی جرمی آب

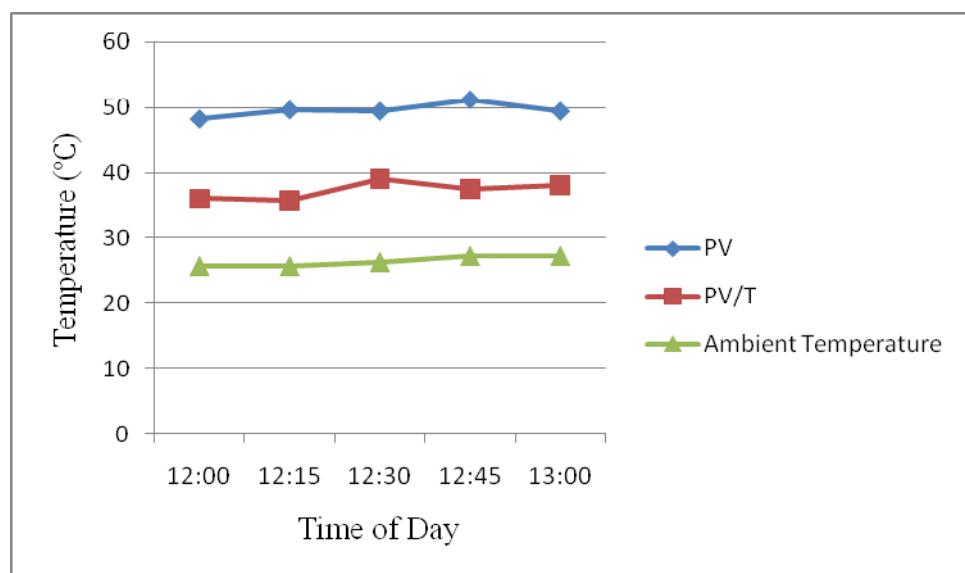
$P_{\text{max}}$ : توان بیشینه خروجی

$Q$ : مقدار حرارت بازیافت شده از سیستم فتوولتائیک/حرارتی

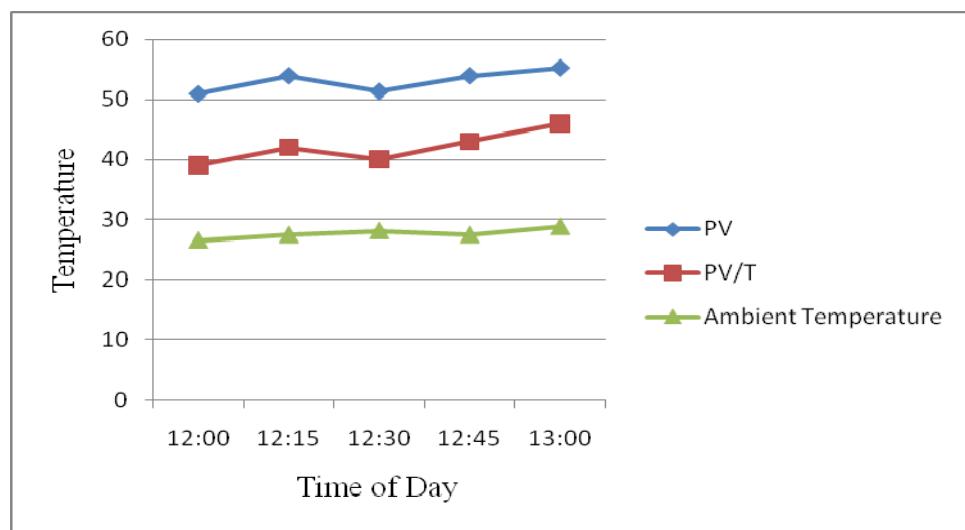
$T_{w,0}$  و  $T_{e,i}$ : دمای ورودی و خروجی آب

$\eta$ : نسبت پوشش سلول فتوولتائیک

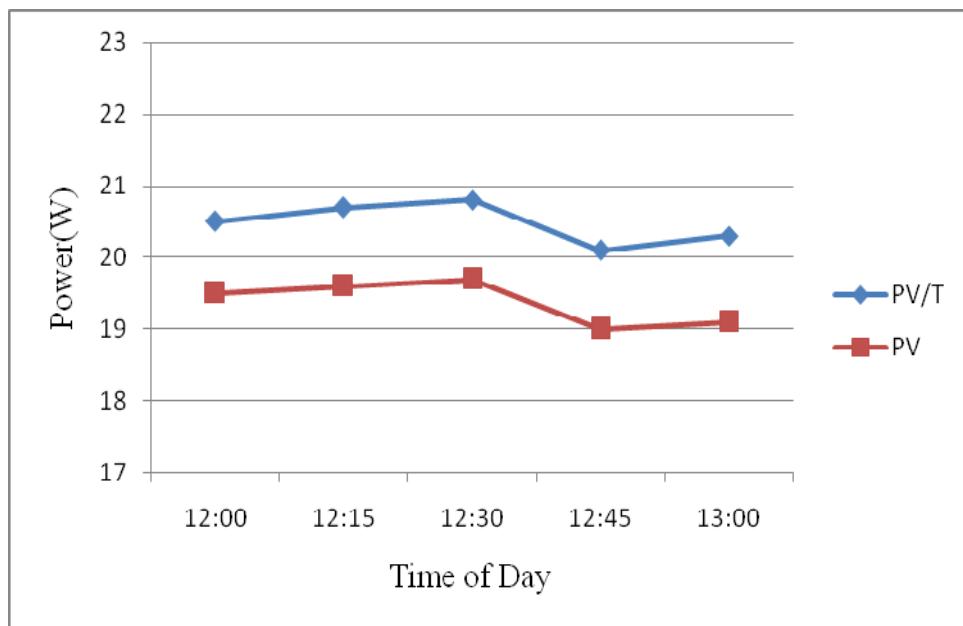
به همین ترتیب، آزمایش‌ها برای نسبت‌های پرشدن ۵۰ و ۶۰ درصد نیز صورت گرفت که نتایج اندازه‌گیری‌ها در شکل‌های ۶ تا ۸ ارایه شده است.



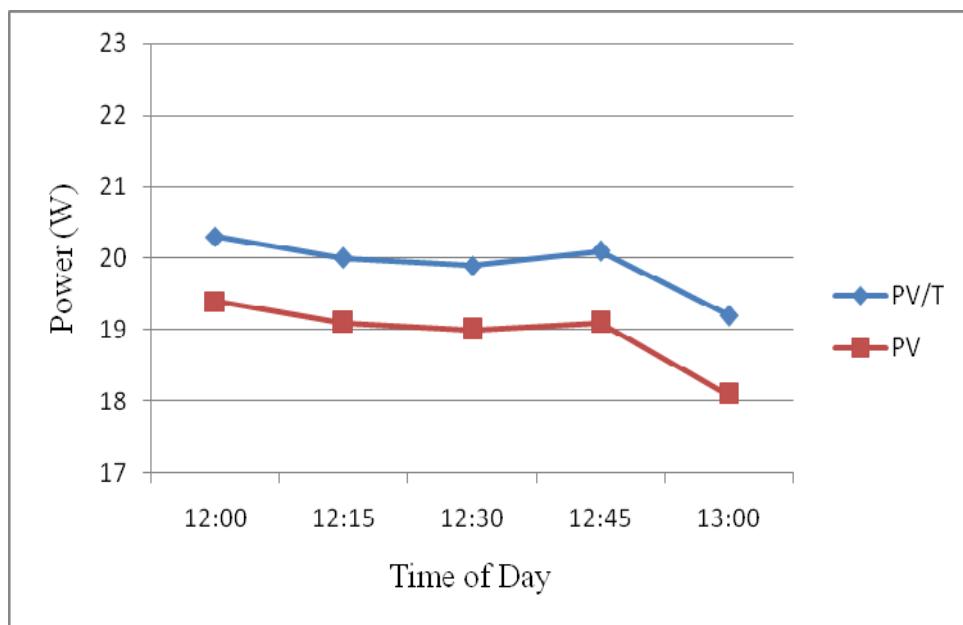
شکل ۶-الف) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پرشدن ۵۰ درصد



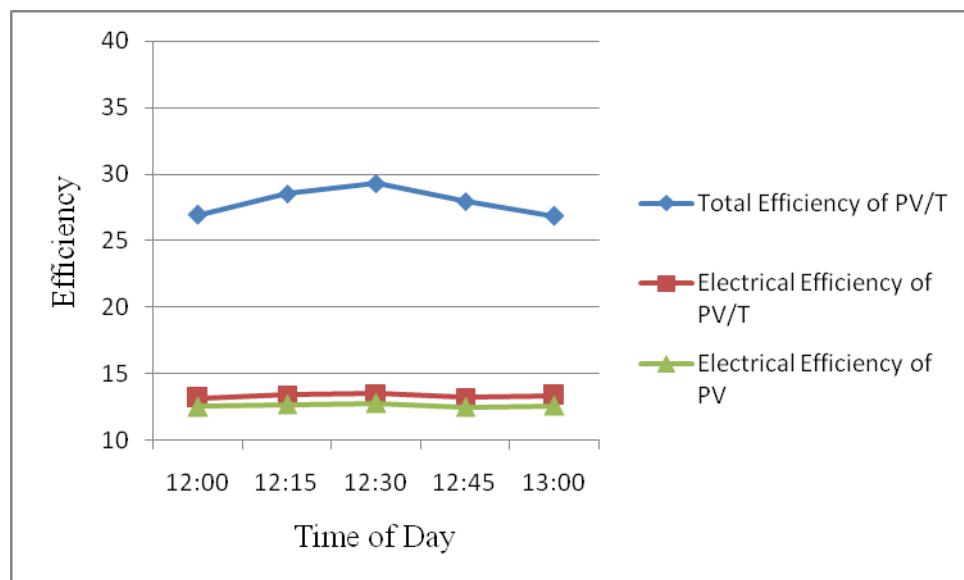
شکل ۶-ب) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پرشدن ۶۰ درصد



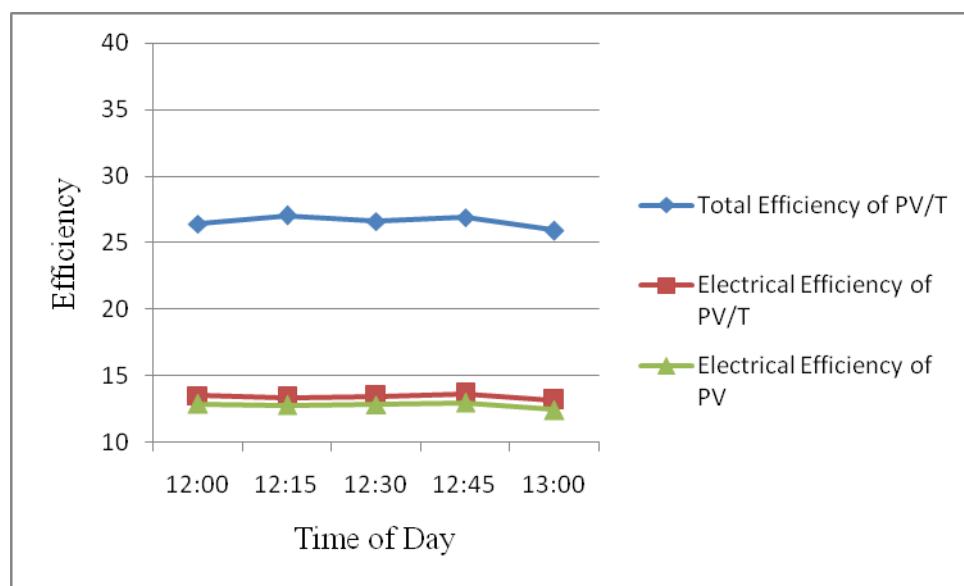
شکل ۷-الف) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۵۰ درصد



شکل ۷-ب) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۵۰ درصد



شکل ۸-الف) مقایسه راندمان ها در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۵۰ درصد



شکل ۸-ب) مقایسه راندمان ها در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۶۰ درصد

در جدول (۲)، نتایج حاصل از مطالعه شکل های ۶ تا ۸ آورده شده است.

جدول (۲) نتایج بررسی ها برای نسبت های پرشدن ۵۰ و ۶۰ درصد

افزایش راندمان کلی	افزایش راندمان الکتریکی	افزایش توان الکتریکی (W)	کاهش دمای پانل (°C)	نسبت پرشدن (درصد)
۱۵/۳	۰/۷۲	۱/۱	۱۲/۱۲	۵۰
۱۳/۷۸	۰/۶۵	۰/۹۶	۱۱/۱۴	۶۰

### نتیجه گیری

در این تحقیق، یک سیستم فتوولتاویک/حرارتی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در این سیستم، از ترموسیفون‌ها برای خنک کاری پانل فتوولتاویک استفاده شد. از متابول به عنوان سیال عامل ترموسیفون‌ها استفاده شد و آزمایش‌ها در نسبت های پرشدن مختلف برای ترموسیفون‌ها انجام گرفت. با مقایسه نسبت های پرشدن مختلف، نسبت پرشدن ۵۰ درصد به عنوان بهترین نسبت پرشدن انتخاب شد، چرا که در این نسبت، سیستم فتوولتاویک/حرارتی توان الکتریکی بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتاویک تولید نمود. همچنین در این نسبت در مقایسه با سایر نسبت های پرشدن، حرارت بیشتری در سیستم فتوولتاویک/حرارتی بازیافت شد. در نسبت پرشدن ۵۰ درصد در طول مدت آزمایش، خنک کاری پانل در سیستم فتوولتاویک/حرارتی سبب شد که این سیستم به طور متوسط  $W/1$  توان الکتریکی بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتاویک تولید نماید. همچنین سیستم فتوولتاویک/حرارتی به طور متوسط  $16/35$  درصد راندمان حرارتی تولید نمود.

### منابع

- [1] Chow, T., T., Pei, G., Fong, K., F., Lin, Z., Chan, A., L., S., Ji, J.2009. “Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover”, Applied Energy, Vol. 86, pp. 310-316.
- [2] Foster, R., Ghassemi, M., Cota, A.2009. “Solar Energy Renewable Energy and the Environment”, Crc Press.

- [3] Joshi, A. S., Dincer, I., Reddy, B. V.2009. "Performance analysis of photovoltaic systems: a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 1884-1897.
- [4] Kern, J., Harris, I.1975. "On the optimum tilt of a solar collector", Solar Energy, Vol. 17, pp. 97-102..
- [5] Lewis, G.1987. "Optimum tilt of a solar collector", Solar and Wind Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 407-410.
- [6] Lof, G. O. G., Tybout, R. A.1973. "Cost of house heating whit solar energy", Solar Energy, Vol. 14, pp. 253-278.
- [7] Noie, S. H.2005. "Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon", Applied thermal engineering, Vol. 25, pp. 495-506.
- [8] Tiwari, G.N., Mishra, R.K., Solanki, S.C.2011. "Photovoltaic modules and their applications: a review on thermal modelling", Applied Energy, Vol.88, pp. 2287-2304.
- [9] . Weng, Z. J., Yang, H. H.2008. "Primary analysis on cooling technology of solar cells under concentrated illumination", Energy Technology, Vol. 29, No. 1, pp. 16-18.