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

میثم مرادقلی[۱]، سیدمصطفی نوعی[۲]

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 می کنند، سیستم های فتوولتائیک/حرارتی قابلیت تولید همزمان برق و گرما را دارند. در این تحقیق، یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شده که از ترموسیفون‌هایی (لوله های گرمایی بدون فتیله) برای خنک کردن پانل فتوولتائیک در آن استفاده شده است. متانول 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 یعنی 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 ۱۶/۳۵درصد راندمان حرارتی تولید نمود.

کلمات کلیدی:
سیستم فتوولتائیک/حرارتی، ترموسیفون، نسبت پرشدن، خنک کردن پانل فتوولتائیک

۱) کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد (نویسنده مسئول) m.moradgholi65@yahoo.com
۲) استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد nowee@um.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقدمه

انرژی خورشیدی یکی از مهمترین منابع انرژی تجدیدپذیر می باشد. کاربردهای عمده انرژی خورشیدی به دو دسته طبقه‌بندی می شوند: سیستم های گرما خورشیدی و سیستم های فتوولتائیک[1]. سیستم های گرما خورشیدی انرژی تابشی خورشید را به انرژی گرمایی و سیستم های فتوولتائیک انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. سیستم های فتوولتائیک در ساختمان ها، حمل و نقل، دستگاه های مستقل (مانند ماشین حساب ها)، کشاورزی (پمپ آب)، روشنایی خیابان ها و تولید هیدروژن کاربرد دارند [۳و۸]. اصلی ترین بخش سیستم های فتوولتائیک، پانل ها هستند که متشکل از سلول های خورشیدی، می‌باشند.پانل فتوولتائیک ۷ تا ۲۲ درصد انرژی نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند [۲]. در سلول های خورشیدی بیشتر تابش خورشید به گرما تبدیل می‌شود که منجر به بالا رفتن دمای سلول ها و در نتیجه، کاهش راندمان الکتریکی پانل، به دلیل افت ولتاژ می شود. ونگ[2] و همکاران [۹]، نشان دادند که افزایش دما به میزان یک کلوین باعث کاهش راندمان الکتریکی به میزان ۰/۲ تا ۰/۵ درصد می شود. علاوه بر این، افزایش دما در دراز مدت طول عمر سلول ها را کوتاه می کند. بنابراین، خنک کردن سلول های خورشیدی پانل های فتوولتائیک اهمیت اساسی دارد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شده، از ترموسیفون ها برای خنک کردن پانل فتوولتائیک استفاده شده است. ترموسیفون ها یکی از انواع لوله های گرمایی می باشند که از بخش های تبخیر کننده، آدیاباتیک و چگالنده تشکیل شده اند. ترموسیفون دوفازی بسته، یک لوله گرمایی بدون نیاز به فتیله بوده که در آن برای بازگشت میعانات سیال عامل از بخش چگالنده به بخش تبخیرکننده از گرانش کمک گرفته می شود. به همین دلیل در ترموسیفون ها بخش چگالنده باید بالاتر از بخش تبخیرکننده 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 دمای کم، امکان پذیر است [۷].

شرح دستگاه و آزمایش

در سیستم فتوولتائیک/حرارتی، ترموسیفون ها پشت پانل قرار گرفتند و یک فاصله بین ترموسیفون ها، در وسط پانل قرار داده شد تا دمای پشت پانل اندازه گیری شود.

مشخصات پانل بکار رفته در سیستم فتوولتائیک/حرارتی در شرایط استاندارد (تابش $\frac{W}{m^2}$ ۱۰۰۰ و دمای$^{\circ}C$ ۲۵) در جدول(۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که سلول های خورشیدی پانل فتوولتائیک از نوع سیلیکونی تک کریستالی می باشند.

1) Photovoltaic
2) Weng

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

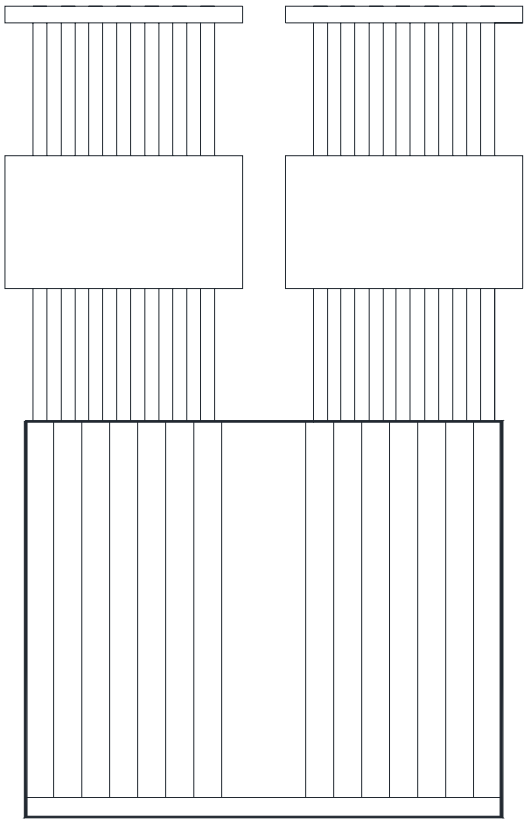
جدول ۱) مشخصات پانل فتوولتائیک

خصوصیت پانل	مقدار
جریان بیشینه	0.797 A
ولتاژ بیشینه	25.1 V
توان بیشینه	20 W
مساحت هر سلول	m^2 0.003
تعداد سلول ها	48
راندمان	13.88

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[1] 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 خلأ 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 عایق‌بندی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



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 آزمایش ها، پانل های فتوولتائیک کنار یکدیگر روی یک پایه به صورت کاملاً هم سطح قرار داده شدند.

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

اطلاعات یادداشت برداری شده به شرح ذیل می باشند :

الف- توان خروجی پانل ها: یک دستگاه MPPT[1] با دقت ۰/۱ W جهت اندازه گیری توان بیشینه خروجی از پانل ها مورد

1) Maximum Power Point Tracking

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

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 رسید، اندازه گیری شود.

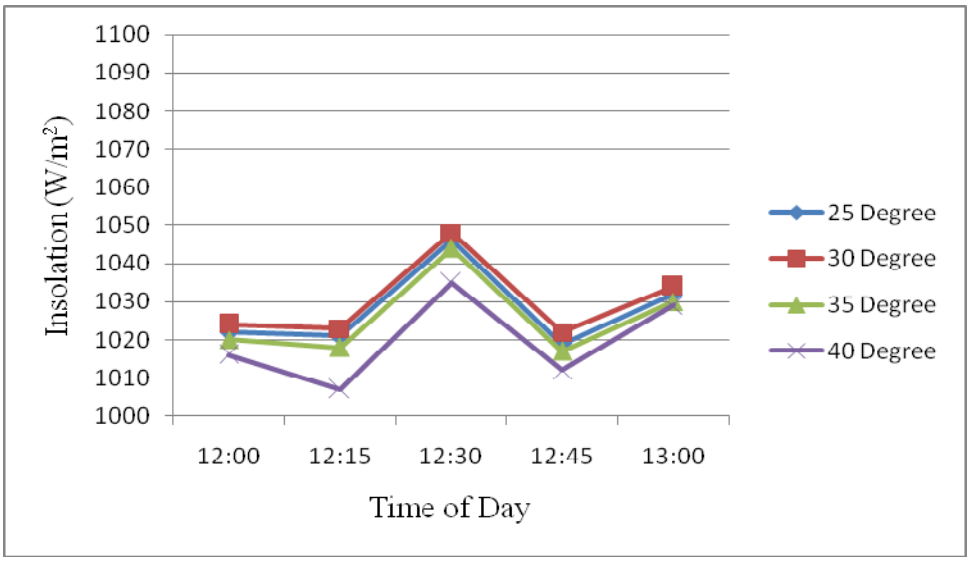
ج- دمای محیط و دمای پانل های فتوولتائیک: برای ثبت دمای پشت پانل های فتوولتائیک از یک ترمومتر لیزری با دقت ۰/۱℃ و برای اندازه گیری دمای محیط هم از سنسور دمایی دستگاه سولار ۳۰۰ استفاده شد.

د- دمای خروجی آب: بدین منظور یک سنسور PT100 با دقت ۰/۱ ℃ دمای خروجی آب را نشان می داد.

نحوه انجام آزمایش‌ها

ابتدا زاویه شیب بهینه برای پانل های فتوولتائیک تعیین شد. مطالعات انجام شده [۴-۶]، بیانگر این مطلب است که زاویه شیب 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 درجه و ۱۷ دقیقه می باشد.

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



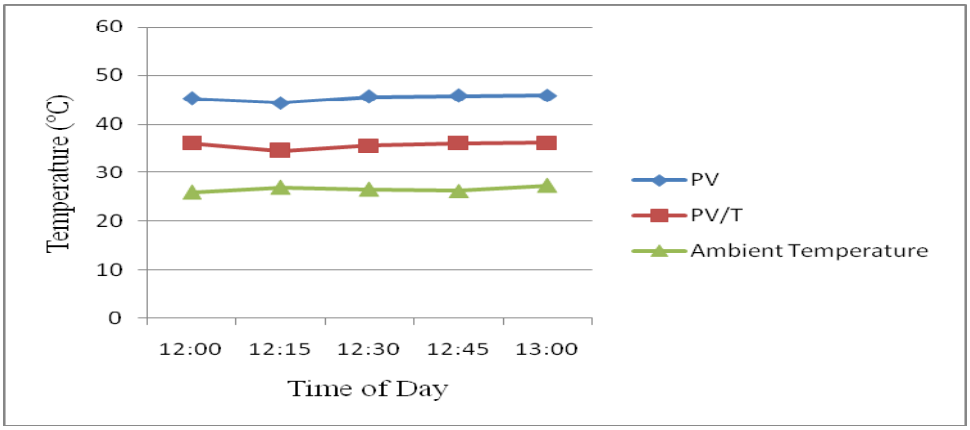
شکل ۲) میزان تابش رسیده به سطح پانل ها در زوایای مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

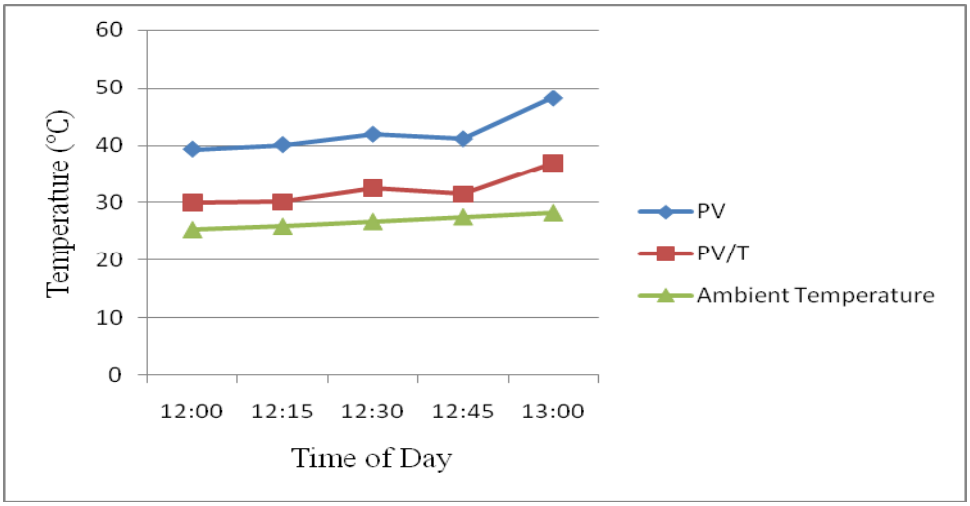
با توجه به شکل (۲)، زاویه‌ای که در آن پانل های فتوولتائیک بیشترین تابش را دریافت می کنند ۳۰° می باشد. بنابراین، برای انجام آزمایش‌ها، پانل های فتوولتائیک رو به جنوب و تحت این زاویه شیب قرار گرفتند.

آزمایش‌ها در شرایط خلأ نسبی اولیه برابر ۰/۹ bar- انجام گرفتند. پس از ایجاد خلأ، متانول به عنوان سیال عامل در نسبت های پر شدن متفاوت درون ترموسیفون ها 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 انجام آزمایش ها برای نسبت های پرشدن ۳۰ درصد و ۴۰ درصد نشان داده شده است.



شکل ۳-الف) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پر شدن ۳۰ درصد

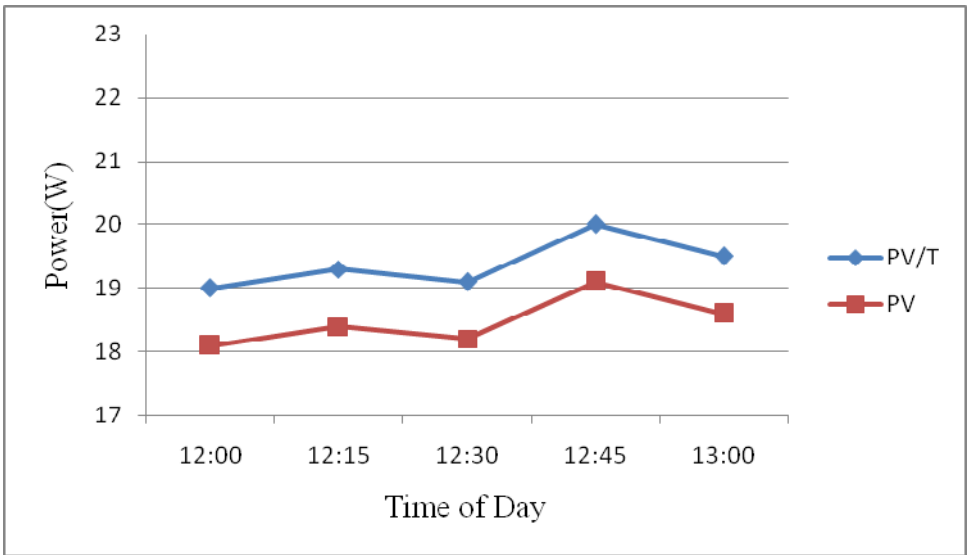


شکل ۳-ب) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پر شدن ۴۰ درصد

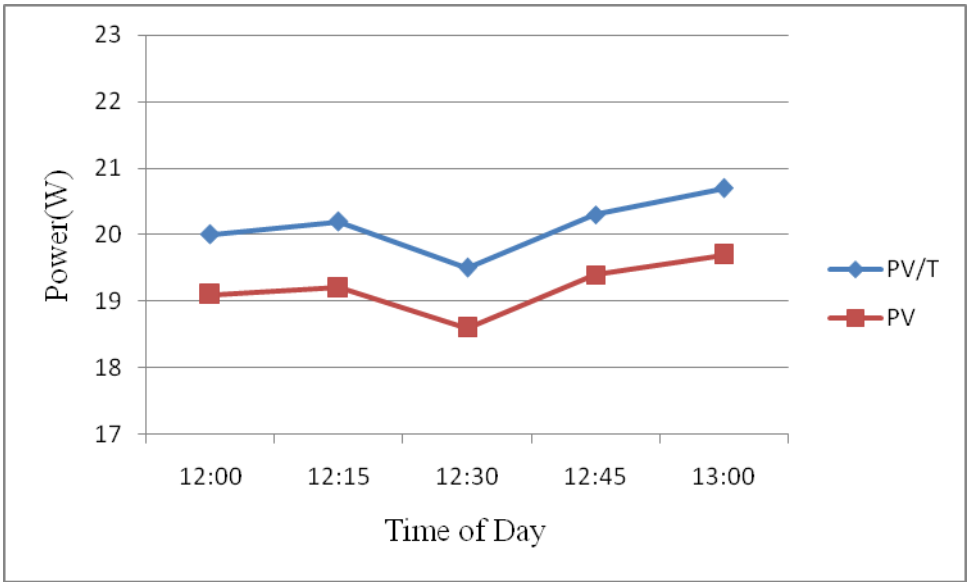
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

با توجه به شکل (۳)، در نسبت های پرشدن ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۹/۷۶℃ و ۹/۹℃ دمای پشت پانل در سیستم فتوولتائیک/حرارتی خنک تر از سیستم فتوولتائیک بوده است.

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



شکل ٤-الف) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۳۰ درصد

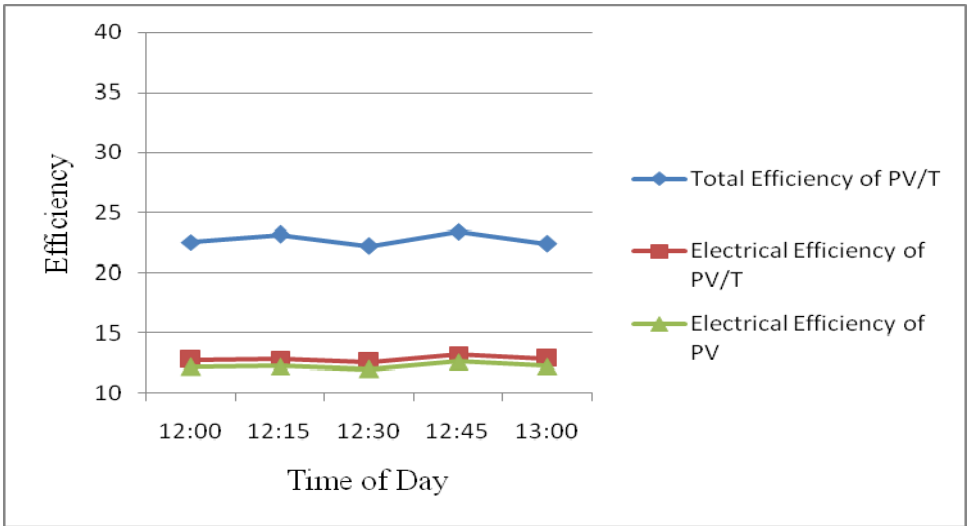


شکل ٤- ب) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ٤٠ درصد

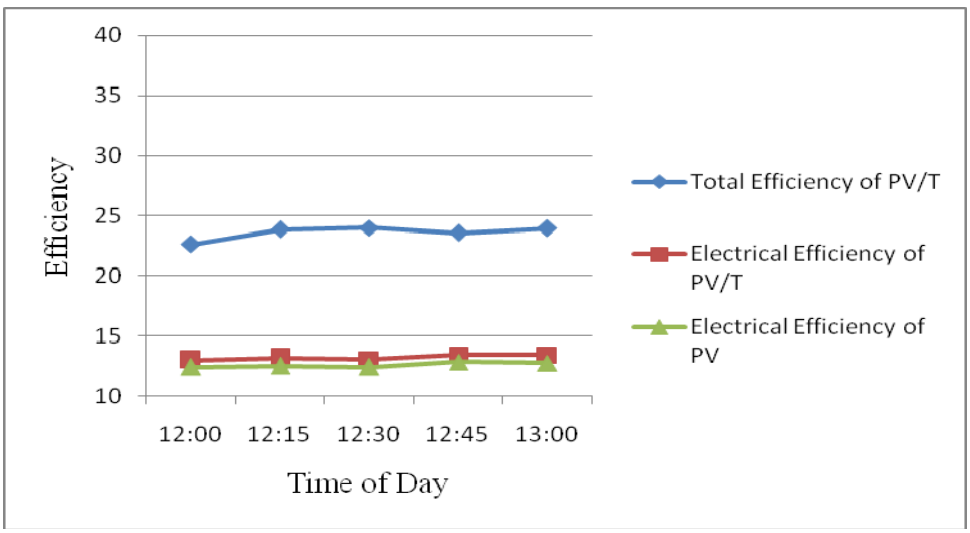
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

خنک کاری پانل در سیستم فتوولتائیک/حرارتی سبب شد تا این سیستم در نسبت پرشدن ۳۰ درصد به طور متوسط ۰/۹W و برای ۴۰ درصد،W ۰/۹۴ توان بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تولید نماید.

در شکل‌های (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 پر شدن ۳۰ درصد



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

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 ۰/۶ درصد راندمان الکتریکی بیشتری تولید نمود، که این افزایش برای نسبت پرشدن ۴۰ درصد، ۰/۶۲ 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:

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

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

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

$$\eta_{th} = \frac{Q}{A_c \cdot I} \times 100$$

که

$$Q = \dot{m} C_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i})$$

$$\xi = \frac{A_{pv}}{A_c}$$

A_c:مساحت کلکتور

A_{pv}: مساحت سلول های خورشیدی پانل فتوولتائیک

$C_{p,w}$: گرمای ویژه آب

I: شدت تابش خورشیدی

$\dot{m}$: دبی جرمی آب

P_{max}: توان بیشینه خروجی

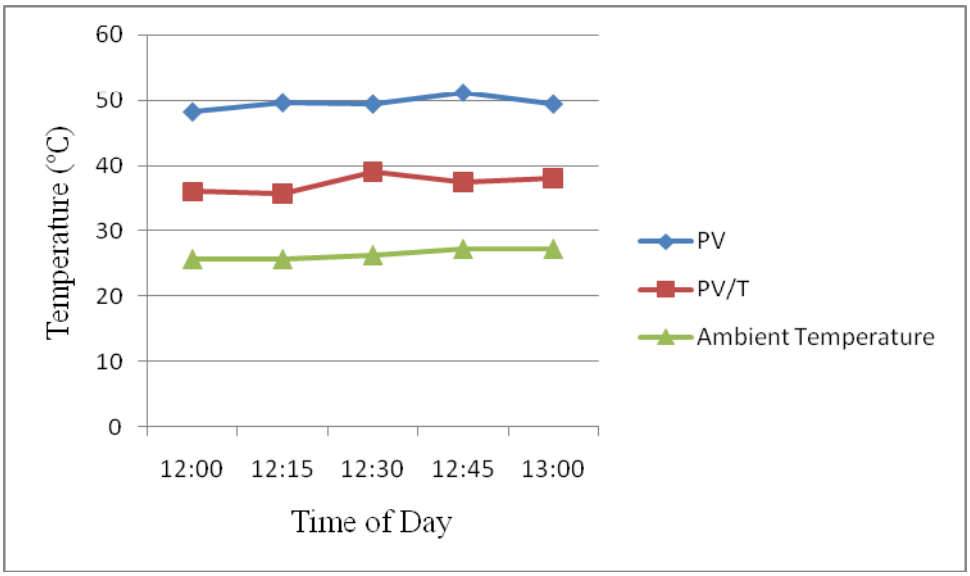
Q:مقدار حرارت بازیافت شده از سیستم فتوولتائیک/حرارتی

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

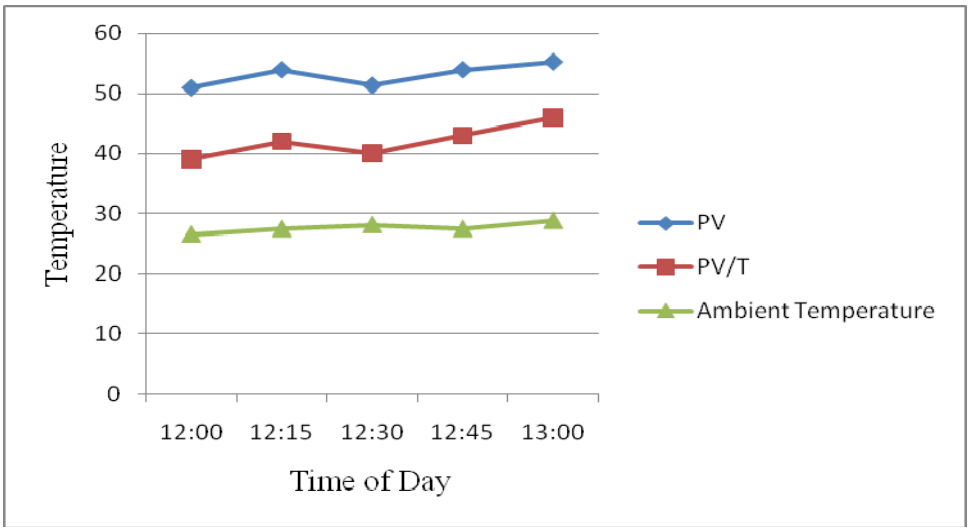
ξ: نسبت پوشش سلول فتوولتائیک

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

به همین ترتیب، آزمایش ها برای نسبت های پرشدن ۵۰ و ۶۰ درصد نیز صورت گرفت که نتایج اندازه گیری ها در شکل‌های ۶ تا ۸ ارایه شده است.

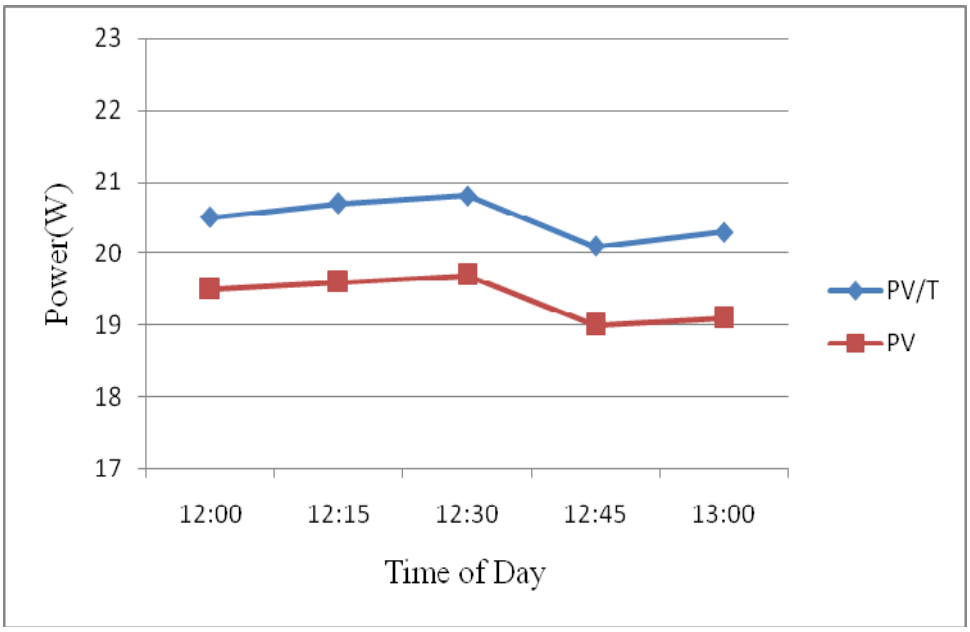


شکل ٦-الف) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پر شدن ۵۰ درصد

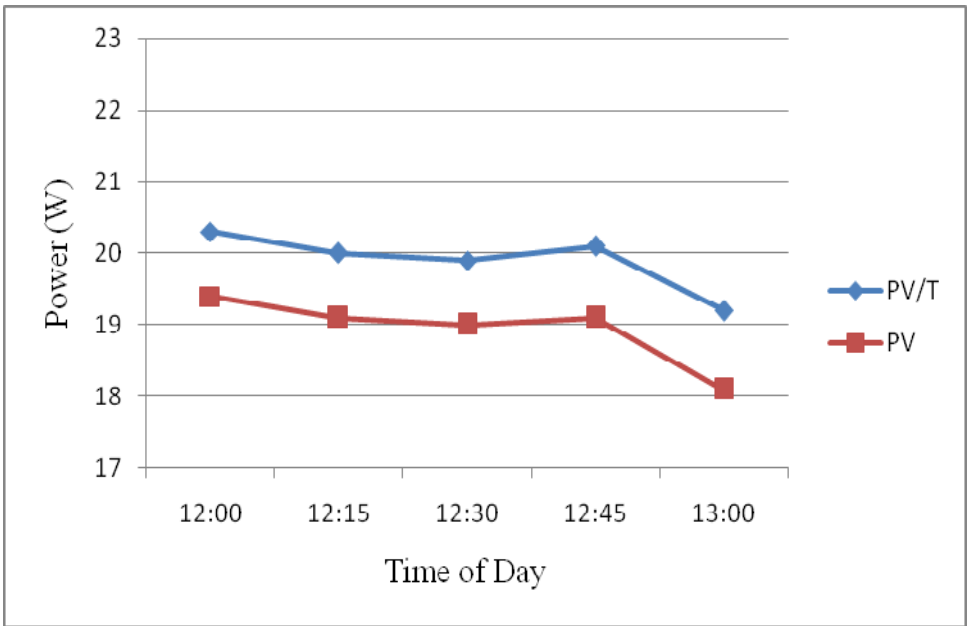


شکل ٦-ب) مقایسه دمای پشت پانل در سیستم های فتوولتائیک و فتوولتائیک/حرارتی در نسبت پر شدن ٦۰ درصد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

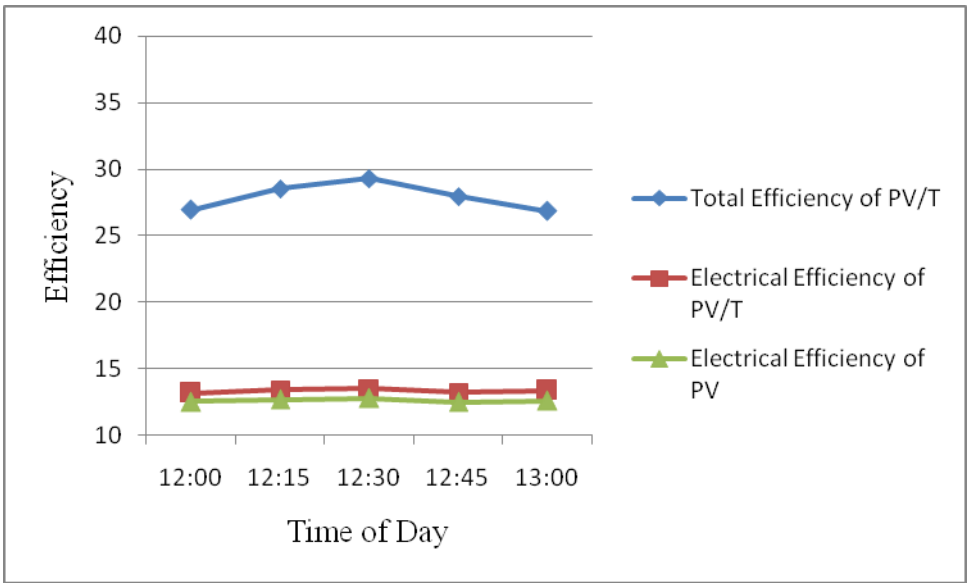


شکل ۷-الف) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۵۰ درصد

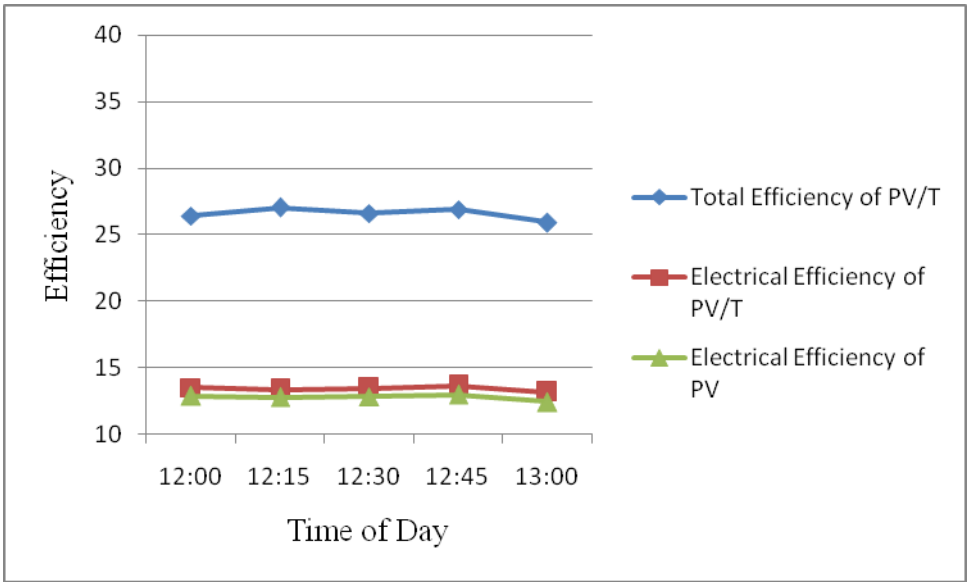


شکل ۷-ب) مقایسه توان خروجی پانل در سیستم های فتوولتائیک/حرارتی و فتوولتائیک در نسبت پر شدن ۵۰ درصد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

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 ٦٠ درصد

نسبت پرشدن *(درصد)*	کاهش دمای پانل($^{\circ}C$)	افزایش توان الکتریکی(W)	افزایش راندمان الکتریکی	افزایش راندمان کلی
۵۰	۱۲/۱۲	۱/۱	۰/۷۲	۱۵/۳
۶۰	۱۱/۱۴	۰/۹۶	۰/۶۵	۱۳/۷۸

نتیجه گیری

در این تحقیق، یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در این سیستم، از ترموسیفون‌ها برای خنک کاری پانل فتوولتائیک استفاده شد. از متانول به عنوان سیال عامل ترموسیفون ها استفاده شد و آزمایش ها در نسبت های پر شدن مختلف برای ترموسیفون ها انجام گرفت. با مقایسه نسبت های پر شدن مختلف، نسبت پرشدن ۵۰ درصد به عنوان بهترین نسبت پرشدن انتخاب شد، چرا که در این نسبت، سیستم فتوولتائیک/حرارتی توان الکتریکی بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تولید نمود. همچنین در این نسبت در مقایسه با سایر نسبت های پرشدن، حرارت بیشتری در سیستم فتوولتائیک/حرارتی بازیافت شد. در نسبت پر شدن ۵۰ درصد در طول مدت آزمایش، خنک کاری پانل در سیستم فتوولتائیک/حرارتی سبب شد که این سیستم به طور متوسط ۱/۱ W توان الکتریکی بیشتری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تولید نماید. همچنین سیستم فتوولتائیک/حرارتی به طور متوسط ۱۶/۳۵ 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]