

ارزیابی آزمایشگاهی اثر نانوسیال سیلیکا در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی

محمد سردارآبادی^۱، محمد پسندیده فرد^۲

^۱دانشجوی دکترای تخصصی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، m.sardarabadi@yahoo.com
^۲دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، mpfard@um.ac.ir

چکیده

به صورت بازتاب و یا تولید حرارت در سلول تلف می‌شود [۱]. حتی یک پیل خورشیدی در حالت ایده‌آل با شرایط آزمایشگاهی نیز تنها قادر است ۴۴٪ از انرژی رسیده از خورشید را به الکتریسیته تبدیل کند، زیرا مابقی انرژی رسیده از لحاظ میزان انرژی توانایی لازم برای جدا سازی الکترون از هسته‌ی ماده‌ی تشکیل دهنده این سلولها برای برقراری جریان الکتریکی را ندارد. رفتار الکتریکی یک واحد فتوولتائیک را می‌توان با معادله کلی رفتار یک دیود مورد ارزیابی قرار داد. در نتیجه این ارزیابی با توجه به اینکه تولید حرارت در سلولها سبب افزایش دما می‌شود، با افزایش دما ولتاژ مدار باز خروجی از واحد فتوولتائیک کاهش یافته و در نتیجه توان الکتریکی خروجی کاهش می‌یابد.

پی جانگ وهمکاران [۲]، یک سیستم جدید برای کلکتور حرارتی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی، که حرارت را توسط میله های مسی به محل جریان سیال منتقل می‌کرد مورد آزمایش قرار دادند. مزیتی که این سیستم در مقایسه با سیستم‌های رایج دارد این است که آنرا می‌توان در مناطق سردسیر بدون یخ‌زدگی سیال، مورد استفاده قرار داد. نتایج بدست آمده از مطالعه آنها مشخص کرد که بازده حرارتی این سیستم ۴۱/۹٪ و بازده الکتریکی ۹/۴٪ است. آنها بر اساس محاسبات قانون اول و دوم ترمودینامیک، بازده کلی سیستم را ۶/۸٪ پیش‌بینی کردند.

چاو [۳]، تاثیر شش پارامتر کلیدی محیطی و داخلی از جمله ضریب پوشش، دمای محیط و ... بر بازدهی قانون اول و دوم ترمودینامیک و نیز بر بازدهی الکتریکی یک سیستم فتوولتائیک حرارتی بررسی کرد. نتایج بازدهی حرارتی و الکتریکی برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای به ترتیب ۵۰/۳٪ و ۹/۳٪ و برای بدون پوشش شیشه‌ای ۴۰/۸٪ و ۱۲/۱٪ بود. همچنین تأثیر پوشش شیشه‌ای کلکتور روی بازده حرارتی و الکتریکی توسط چاو [۳]، مورد بررسی قرار گرفت.

روسن و راکش [۴]، به ارزیابی عملکرد فین در یک واحد فتوولتائیک حرارتی با سیال خنک کننده هوا پرداختند. در مطالعه آنها، تأثیرات حضور فین در کانال جریان هوا، عمق کانال جریان هوا، نرخ جریان سیال، دمای هوای ورودی و ضریب پوشش، روی بازدهی الکتریکی و حرارتی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. فین گسترش یافته به طور قابل توجهی دمای سلول را، از $82^{\circ}C$ به $66^{\circ}C$ کاهش داد. حضور فین، در بازدهی الکتریکی حدود ۳٪ و در

با توجه به معادله‌ی کلی دیود که رفتار یک سیستم ساده فتوولتائیک را بیان می‌کند، افزایش دما سبب کاهش ولتاژ مدار باز و در نتیجه کاهش بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک می‌شود. با افزودن سیستم بازیاب حرارت به واحد فتوولتائیک، می‌توان علاوه بر بازده الکتریکی، بازده کلی سیستم را که شامل بازده الکتریکی و حرارتی می‌شود، افزایش داد. این سیستم‌ها به واحدهای فتوولتائیک-حرارتی معروف هستند. در این تحقیق، با ساخت یک سیستم کامل فتوولتائیک-حرارتی به صورت آزمایشگاهی، به عنوان ایده ای بدیع میزان تاثیر استفاده از نانوسیال به عنوان خنک کننده سلولها، از لحاظ انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. کلکتور حرارتی مورد استفاده در این آزمایش، از نوع صفحه تخت است. سیالهای مورد استفاده در این آزمایش، آب مقطر خالص و نانوسیال سیلیکا با سیال پایه‌ی آب مقطر با غلظت حجمی ۱/۲ درصد حجمی می‌باشد. در بازده حرارتی واحد فتوولتائیک-حرارتی در مورد نانوسیال با غلظت ۱/۲ درصد، میانگین افزایش بازدهی ۱۲/۸ درصد نسبت به آب مقطر خالص مشاهده می‌شود. همچنین با استفاده از آب مقطر به عنوان خنک کننده، برای میانگین تشعشع روزانه ۹۲۱ وات بر متر مربع، افزایش ۱۹/۳۶ واحد انرژی در کل سیستم، و برای نانوسیال/آب مقطر با غلظت ۱/۲ درصد حجمی مقدار افزایش ۲۴/۳۱ واحد انرژی، به ازای واحد سطح کلکتور مشاهده می‌شود.

واژه های کلیدی

فتوولتائیک حرارتی، نانوسیال سیلیکا، بازده انرژی، بازده انرژی.

۱) مقدمه

واحدهای فتوولتائیک (PV) به منظور تبدیل مستقیم تشعشع خورشید به انرژی الکتریکی طراحی شده‌اند. پذیرش استفاده از این تکنولوژی به صورت گسترده، بستگی به میزان بازده میزان تولید انرژی نسبت به میزان هزینه، دوام و قابلیت اطمینان آنها برای تامین انرژی مورد نیاز دارد. بر اساس نتایج تجربی در شرایط واقعی حداکثر بازده الکتریکی این واحدها وابسته به نوع سلولها، بین ۶٪ تا ۱۸٪ می‌باشد که این بازدهی به جنس سلولها، روش چینش سلولها و با پارامترهای مربوط به مواد به کار رفته در آنها بستگی دارد. بنابراین بیش از ۸۰٪ از انرژی رسیده به سلولها به الکتریسیته تبدیل نشده و

بازدهی حرارتی حدود ۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در تحقیق انجام شده توسط آنها، ارزیابی‌های گسترده‌ای برای خروجی‌های الکتریکی و حرارتی متاثر از ضریب پوشش سلولها توسط کلکتور، گزارش شده است و نشان داده شده که ضریب‌های پوشش بالا به سبب تولید بیشتر الکترونیسته سودمند خواهد بود.

در این تحقیق به عنوان ایده‌ای جدید، اثر تغییر سیال خنک کننده به نانوسیال در بازدهی یک سیستم فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. کلکتور مورد استفاده در این آزمایش از نوع صفحه تخت شامل شبکه‌ای از لوله‌های مسی می‌باشد.

۲) تحلیل بازدهی

۱-۲) بازدهی از لحاظ قانون اول ترمودینامیک (انرژی)

از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک بازدهی کلی یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی می‌تواند با استفاده از تعریف بازده از لحاظ انرژی ارزیابی شود این ارزیابی مهم‌ترین قسمت مطالعات و کارهای سایر محققان را تشکیل می‌دهد.

با تعریف دوره زمانی از t_1 تا t_2 خواهیم داشت:

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_{th} + A_{pv} \dot{E}_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (G) dt} = \eta_{th} + r\eta_{pv} \quad (1)$$

در رابطه فوق \dot{E}_t توان حرارتی خروجی بر واحد سطح کلکتور، \dot{E}_{pv} توان خروجی فتوولتائیک بر واحد سطح سلول، G شدت تشعشع بر واحد سطح کلکتور، A_c مساحت سطح کلکتور، A_{pv} مساحت سطح سلولها، η_t بازده حرارتی فتوولتائیک، η_{pv} بازده سلولهای فتوولتائیک، و r ضریب پوشش می‌باشد که عبارتست از مساحت سطح موثر سلولهای فتوولتائیک به مساحت سطح موثر کلکتور که به صورت $r = \frac{A_{pv}}{A_c}$ تعریف می‌شود.

۲-۲) بازدهی از لحاظ قانون دوم ترمودینامیک (انرژی)

بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط فوجیساوا و تانی [۵]، با فرض برابری اولیه دمای سیال با دمای محیط، بازده کلی از لحاظ انرژی برای سیستم فتوولتائیک حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon_{pvt} = \varepsilon_{pv} + \varepsilon_t = \eta_{pv} + \eta_t \left(1 - \frac{T_a}{T_{f,out}}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ε_{pv} بازدهی انرژی سلولهای فتوولتائیک، ε_t بازدهی انرژی کلکتور حرارتی، T_a دمای محیط و $T_{f,out}$ دمای نهایی سیال خنک کننده سلولها می‌باشند. به دلیل اینکه توان انرژی الکتریکی خروجی معادل با کار مفید در نظر گرفته می‌شود، ε_{pv} با η_{pv} هم ارز می‌باشد. ε_t با η_t رابطه‌ای به صورت بازدهی

کارنو خواهد داشت که در ترم دوم معادله مشخص می‌باشد. در رابطه (۲)، دو ساده سازی کلی صورت گرفته است: اولاً ضریب پوشش که عامل مهمی در تعیین صحیح بازدهی دخالت دارد، در نظر گرفته نشده است، ثانیاً، انرژی حاصل از تشعشع نیز در رابطه استفاده نشده است. با اصلاح رابطه توسط چاو [۳ و ۶]، رابطه‌ای اصلاح شده‌ی زیر ارائه شد:

$$\varepsilon_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_t + A_{pv} \dot{E}_{pv})}{A_c \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{sun} dt} = \varepsilon_t + r\varepsilon_{pv} \quad (3)$$

در این رابطه \dot{E}_{pv} انرژی خروجی فتوولتائیک بر واحد سطح سلول، \dot{E}_t انرژی حرارتی خروجی بر واحد سطح کلکتور و \dot{E}_{sun} انرژی ورودی تشعشع خورشید می‌باشد. انرژی‌های خروجی توسط رابطه‌های (۴) و (۵)، به انرژی‌های خروجی مربوط می‌شوند.

$$\dot{E}_{pv} = \dot{E}_{pv} \quad (4)$$

$$\dot{E}_t = \dot{E}_t \left(1 - \frac{T_a}{T_{f,out}}\right) \quad (5)$$

در ارزیابی بازدهی سیستم‌های انرژی خورشیدی از لحاظ انرژی، روش‌های مختلفی برای محاسبه انرژی تشعشع در طی بیست سال گذشته ارائه شده است. در این بین، سه روش محاسبه‌ی عمومی‌تر که توسط پیتالا [۷]، اسپنر [۸] و جتر [۹]، ارائه شده است که به ترتیب عبارتند از:

$$\dot{E}_{sun} = G \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)\right] \quad (6)$$

$$\dot{E}_{sun} = G \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)\right] \quad (7)$$

$$\dot{E}_{sun} = G \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}}\right) \quad (8)$$

در روابط فوق T_a دمای محیط و T_{sun} دمای تشعشع خورشید است که دمای آن به عنوان جسم سیاه 5770 K فرض می‌شود.

اختلاف نتایج سه روش فوق در عمل کمتر از ۲ درصد می‌باشد بنابراین به منظور سادگی محاسبات، رابطه‌ی (۸) را به عنوان رابطه‌ی اصلی برای محاسبه‌ی انرژی ورودی خورشید انتخاب می‌کنیم.

۳-۲) بازدهی الکتریکی

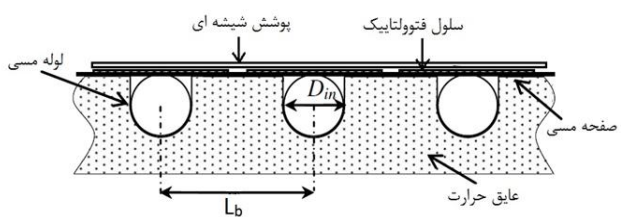
توان الکتریکی دریافتی از واحد فتوولتائیک (P_m)، بر میزان انرژی ورودی که میزان تشعشع موثر جذب شده توسط سلولها (G_{eff})،

بخش الکتریکی شامل صفحات فتوولتائیک از نوع مونوکریستال سیلیکونی با توان نامی ۴۰ وات، از نوع خروجی جریان مستقیم، باطریهای ذخیره سازی، شارژ کنترلرها جهت محافظت از باطریها و کنترل ورود مصرف کننده به مدار در زمانهای مشخص، و در نهایت مصرف کننده‌ها که از نوع جریان مستقیم انتخاب شده‌اند می‌باشد. به منظور بررسی صحیح میزان تاثیر تغییر سیال خنک کننده در بازده، دو سیستم کاملا مشابه، که یکی دارای کلکتور حرارتی و دیگری بدون کلکتور حرارتی است انتخاب و به صورت همزمان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند (شکل ۲). به این طریق میتوان دو سیستم را از لحاظ میزان افزایش بازدهی الکتریکی مورد ارزیابی قرار داد و امکان انجام آزمایش‌ها در شرایط مختلف جوی بدون دخالت تغییرات محیط در محاسبات فراهم می‌شود.



شکل ۲: نمایی از سیستم آزمایشگاهی ساخته شده و نصب شده در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد.

شکل ۳، مقطع برش خورده از کلکتور حرارتی مورد استفاده در سیستم را نشان میدهد.



شکل ۳: برش عرضی از کلکتور لوله‌ای فتوولتائیک-حرارتی.

آزمایش‌ها در طول روز در زاویه و جهت ثابت صفحات نسبت به افق و سمت انجام گرفته است. زاویه انتخاب شده برای قرارگیری صفحات نسبت به افق در طول روز با انجام محاسبات تابش در حالت بهینه در طول دوره آزمایش‌ها، ۳۲ درجه میباشد. سیالهای استفاده شده به منظور خنک سازی صفحات فتوولتائیک، آب مقطر خالص و نانوسیلیکا با غلظت حجمی ۱/۲٪ در سیال پایه آب مقطر می‌باشد. نانو سیلیکا با قطر ذرات ۲۰ نانومتر و درصد خلوص ۹۹/۹ درصد

است به عنوان بازده تبدیل توان الکتریکی یک پیل خورشیدی تعریف می‌شود (رابطه ۹).

$$\eta_{elec} \equiv \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{G_{eff}} \quad (9)$$

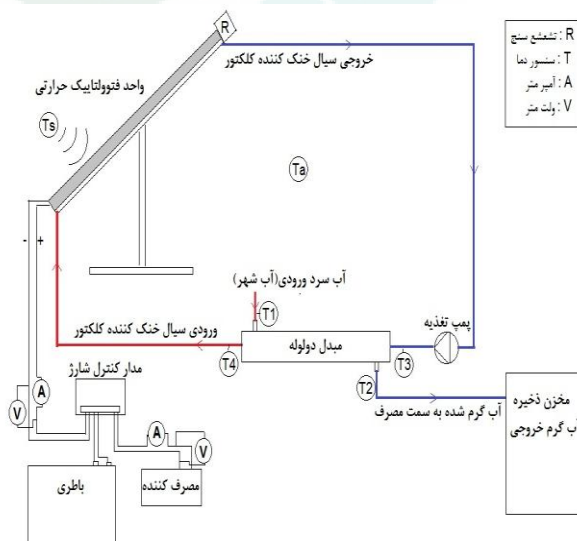
در رابطه فوق FF عامل پرکنندگی نامیده می‌شود که صرفاً نسبت مساحت بزرگ‌ترین مستطیلی است که می‌تواند زیر منحنی شدت جریان بر حسب ولتاژ یک واحد فتوولتائیک قرار بگیرد، به حاصل ضرب ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه (به ترتیب V_{oc} و I_{sc}) می‌باشد. بنابر این برای عامل پرکنندگی خواهیم داشت:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، P_m حداکثر توان الکتریکی به دست آمده در شرایط استاندارد واحد فتوولتائیک مورد نظر می‌باشد.

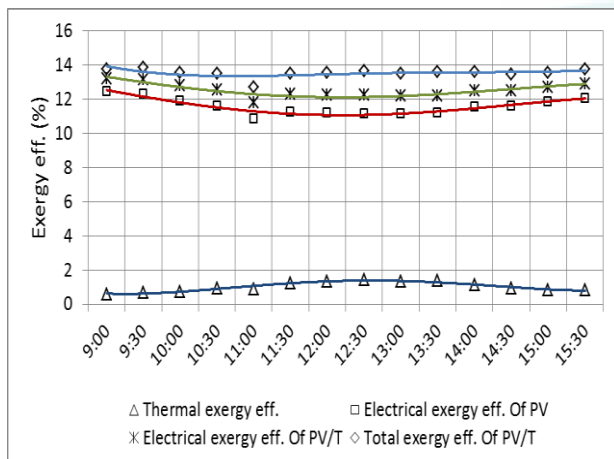
۳ توصیف سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی ساخته شده شامل دو قسمت اصلی حرارتی و الکتریکی می‌باشد. قسمت حرارتی سیستم، شامل دو مدار جریان سیال می‌باشد. یک مدار جریان بسته، که سیال با عبور از کلکتور نقش خنک‌کننده صفحات فتوولتائیک را بر عهده دارد و یک مدار جریان باز آب شهر، حرارت را از سیال خنک‌کننده کلکتور در مبدل دولوله‌ای، جذب و آن را برای جریان مجدد در مدار خود خنک می‌سازد. آب شهر با جذب حرارت می‌تواند به عنوان آب پیش‌گرم در صنایع یا مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱، شماتیک سیستم آزمایشگاهی و محل قرارگیری اجزای مختلف را در سیستم نشان می‌دهد.

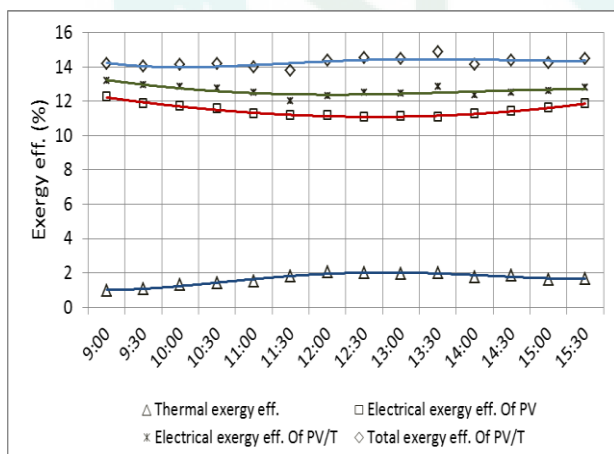


شکل ۱: شماتیک کلی سیستم آزمایش.

با استفاده از روابط (۳)، (۴)، (۵) و (۸)، و نیز مقادیر اندازه‌گیری شده از میزان تشعشع، دمای محیط، دمای سطح سلولها و دمای سیال در ورود و خروج از کلکتور، می‌توان ارزیابی مناسبی از بازدهی به لحاظ قانون دوم ترمودینامیک انجام داد (شکل‌های ۷ و ۸). در این ارزیابی‌ها می‌توان اثر هر یک از عوامل محیطی را در بازدهی حرارتی و الکتریکی از لحاظ انرژی مورد استفاده (در کلکتور واحد فتوولتائیک حرارتی) در اثر سیال‌های مورد استفاده (در کلکتور واحد فتوولتائیک حرارتی) در بازدهی الکتریکی و حرارتی نسبت به سیال دیگر و نیز نسبت به حالت مرجع، که واحد فتوولتائیک بدون کلکتور است را بررسی کرد.



شکل ۷: تغییر بازده انرژی روزانه واحد فتوولتائیک-حرارتی با سیال عامل آب مقطر در مقایسه با واحد فتوولتائیک بدون کلکتور حرارتی در طول روز.



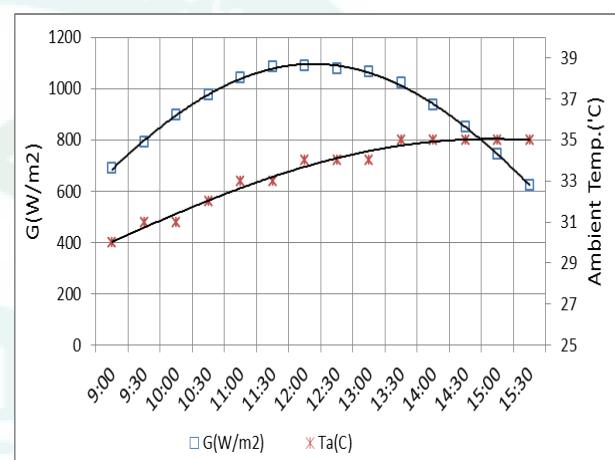
شکل ۸: تغییر بازده انرژی روزانه واحد فتوولتائیک-حرارتی با سیال عامل آب مقطر/نانوسیلیکا ۱.۲٪، در مقایسه با واحد فتوولتائیک بدون کلکتور حرارتی در طول روز.

با اینکه میزان بازدهی انرژی حرارتی از لحاظ مقداری حدود ۵ برابر بازده الکتریکی واحد فتوولتائیک حرارتی مورد آزمایش است اما میزان بازده انرژی حرارتی، در مقایسه با بازدهی انرژی الکتریکی نسبتاً پایین می‌باشد (مقایسه‌ی شکل‌های ۶، ۷ و ۸). دلیل اصلی این موضوع، پایین بودن دمای سیال در ورودی کلکتور، نسبت به دمای محیط است (میانگین دمای ورود به کلکتور ۲۶/۳ درجه سانتی‌گراد و

توسط یک حمام التراسونیک^۱ در سیال پایه مخلوط شده است. کنترل انتخابی جهت تحلیل سیستم شامل کلکتور و واحد فتوولتائیک می‌باشد. مکان مورد آزمایش عرض جغرافیایی ۳۶/۴ درجه و زاویه سمت صفحه رو به جنوب می‌باشد. در روز انجام آزمایش‌ها میانگین تشعشع ۹۲۱ وات بر متر مربع اندازه‌گیری شده است.

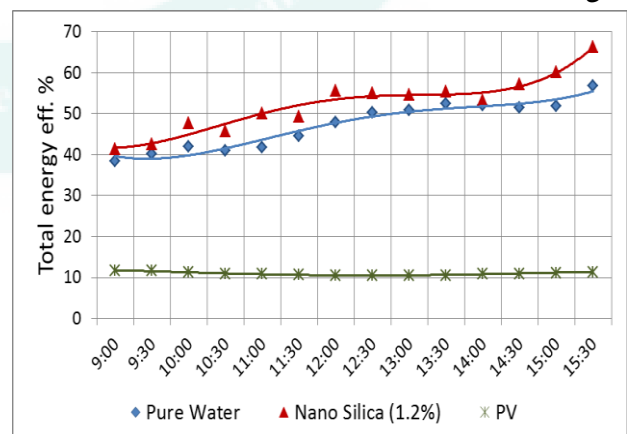
۴ نتایج و بحث

آزمایشها در طول روز انجام و در ساعت‌های مشخص اطلاعات بدست آمده ثبت شده است. تغییرات میزان تشعشع موثر و دمای محیط در روز انجام آزمایش‌ها که در تحلیل‌ها به عنوان پارامترهای موثر به کار گرفته می‌شوند در شکل ۵، مشخص می‌باشد.



شکل ۵: تغییر تشعشع رسیده به سطح سلول‌ها و تغییرات دمای محیط در طول روز مورد آزمایش.

تغییرات بازدهی کلی روزانه واحد فتوولتائیک حرارتی، با سیال خنک‌کننده‌ی آب مقطر و نانوسیال سیلیکا، از لحاظ انرژی که شامل مجموع بازدهی حرارتی و الکتریکی است که با استفاده از رابطه (۱) و جایگذاری اطلاعات برگرفته از آزمایش‌ها در این رابطه در شکل ۶، نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییر بازده کلی روزانه واحد فتوولتائیک و واحد فتوولتائیک-حرارتی با سیال‌های عامل آب مقطر و آب مقطر/نانوسیلیکا ۱.۲٪.

^۱ Ultrasonic

سیستمها برای سیالهای مورد آزمایش، مقایسه شده‌اند تا معیار صحیحی برای میزان تاثیر نانوسیال به عنوان خنک کننده فراهم آید. بنابر نتایج به دست آمده استفاده از نانوسیال سیلیکا به عنوان خنک کننده، می‌تواند راهی برای افزایش بازدهی کل سیستم فتوولتائیک و به طور خاص در اگزرژی حرارتی یک سیستم فتوولتائیک- حرارتی که در این آزمایش این میزان حدود ۳۶٪ افزایش نسبت به آب مقطر خالص (برای میانگین تشعشع دریافتی ۹۲۱ وات بر متر مربع) حاصل شد، باشد.

۶ مراجع

- [1] Dubey, S., Sandha, G.S., and Tiwari, G.N., 2009. "Analytical expression for efficiency of PV/T hybrid air collector". Applied Energy, 86, pp. 697-705.
- [2] Gang, P., Hide, B., and Tao, Z., 2011. "A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system". Solar Energy, 85, pp. 911-921.
- [3] Chow, TT., 2009. "Energy and exergy analysis of photovoltaic –thermal collector with and without glass cover". Applied Energy, 86, pp. 310-316.
- [4] Rosen, M., Rakesh, 2011. "Performance evaluation of a double pass PV/T Solar air heater with and without fins". Applied Thermal Energy, 31, pp. 1402-1410.
- [5] Fujisawa and Tani, 1997. "Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector". Solar Energy Mater Solar Cells, 47, May, pp. 135-148.
- [6] Chow, TT., and He, 2008. "Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system". Applied Thermal Energy, Vol. 28, May, pp. 1356-1364.
- [7] Petela R., 1964. "Energy of heat radiation. J Heat Transfer", 86, May, pp. 187-92.
- [8] Spanner DC., 1964, Introduction to thermodynamics. London: Academic Press.
- [9] Jeter SM., 1981. "Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation". Solar Energy, Vol. 26, pp. 231-6.

[۱۰] سردارآبادی، محمد، پسندیده فرد، محمد، ۱۳۹۰. "تحلیل واحدهای فتوولتائیک- حرارتی و بررسی عوامل موثر بر بازده آنها"، دومین کنفرانس انرژیهای تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، دانشگاه تهران.

میانگین دمای محیط ۳۳٫۸ درجه سانتی‌گراد)، که سبب نزدیکی دمای خروجی کلکتور به دمای محیط می‌شود.

با افزودن کلکتور حرارتی به واحد فتوولتائیک در حالت سیال عامل آب مقطر، شاهد افزایش ۱۹/۳۶ واحد اگزرژی، و برای نانوسیال/آب مقطر با غلظت ۱/۲ درصد حجمی ۲۴/۳۱ واحد اگزرژی کل سیستم، به ازای واحد سطح کلکتور می‌باشیم.

در جدول ۱، به صورت خلاصه نتایج میانگین محاسبات اگزرژی رسیده به سیستم و اگزرژی مفید حاصل از واحد فتوولتائیک حرارتی، به صورت حرارتی و الکتریکی نسبت به واحد فتوولتائیک بدون کلکتور حرارتی گزارش شده است.

جدول ۱: میانگین اگزرژی روزانه (وات بر متر مربع) دریافتی از خورشید و واحد فتوولتائیک حرارتی در مقایسه با واحد فتوولتائیک برای واحد سطح از کلکتور فتوولتائیک- حرارتی.

نوع سیال	اگزرژی ورودی خورشید	اگزرژی حرارتی	اگزرژی الکتریکی	اگزرژی کل
آب مقطر	۸۷۱/۳	۱۰/۷۴	۱۰۸/۶۲	۱۱۹/۳۶
سیلیکا ۱/۲٪	۸۷۱/۱	۱۴/۶۴	۱۰۹/۶۷	۱۲۴/۳۱
بدون کلکتور	۸۷۱/۷	---	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

با بررسی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، با افزودن کلکتور حرارتی به واحد فتوولتائیک، شاهد افزایش چشمگیری در مقدار کل انرژی به دست آمده برای واحد سطح هستیم. در بازده حرارتی واحد فتوولتائیک حرارتی، با استفاده از نانوسیال ۱/۲ درصد، میزان افزایش بازدهی کل سیستم ۱۲/۸ درصد نسبت به آب مقطر خالص مشاهده می‌شود.

۵ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، با ساخت یک سیستم کامل فتوولتائیک حرارتی اثر نانوسیال سیلیکا به عنوان خنک کننده، از لحاظ انرژی و اگزرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه‌ی نتایج با خروجی انرژی و اگزرژی یک واحد فتوولتائیک مشابه بدون کلکتور حرارتی در طول روز به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت بازده کل