

آنالیز انرژی و انرژی سلول‌های فتوولتائیک-حرارتی با مدل‌سازی توسط نرم‌افزار TRANSYS و بررسی عوامل موثر بر آنها

ایلقار اطهری^۱، فرشاد ترابی^۲، احمد توسلی^۳

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران - دانشکده محیط زیست و انرژی - انتهای بزرگراه اشرفی اصفهانی به سمت حصارک
elgar.athari@gmail.com

چکیده

عملکرد سلول‌های فتوولتائیک-حرارتی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله دما است. همچنین برای ارزیابی عملکرد سلول فتوولتائیک-حرارتی، دانستن ضریب تلفات کلی که خود وابسته به شرایط آب و هوایی است ضروری است. در این تحقیق با مدل‌سازی یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی با استفاده از نرم افزار TRANSYS رفتار دینامیکی دمای سیال خروجی از سلول فتوولتائیک-حرارتی، دمای سلول، بازده الکتریکی، بازده حرارتی تحلیل شده و عوامل موثر بر افزایش راندمان انرژی و انرژی بررسی شد. نتایج حاصل از تغییرات دبی سیال نشان داد که حالت بهینه دبی سیال وقتی راندمان انرژی و انرژی بیشترین مقدار خود

را دارد در $m = 0.01 \text{ kg/s}$ صورت می‌گیرد. همچنین با افزایش طول سلول فتوولتائیک-حرارتی راندمان انرژی کاهش ولی راندمان انرژی افزایش می‌یابد. که $L = 2m$ به عنوان طول بهینه در نظر گرفته شد. مدل‌سازی برای گرم‌ترین روز سال و ماه نشان داد توان تولیدی سلول فتوولتائیک-حرارتی با شدت تابش خورشیدی رابطه مستقیم دارد. و نزدیک ظهر توان تولیدی به ۱۸۰ وات می‌رسد. راندمان سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی را به دو صورت انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفت. راندمان انرژی را حدود ۳۵ الی ۷۰ درصد و راندمان انرژی را حدود ۱۱ الی ۱۳ درصد بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: فتوولتائیک-حرارتی، موازنه انرژی، ضرایب انتقال حرارت، راندمان انرژی و انرژی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

۲- استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیر طوسی

۳- دانشیار دانشکده محیط زیست و انرژی، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

۱- مقدمه

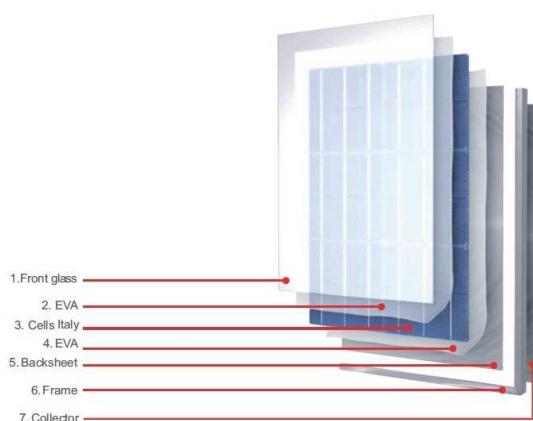
مطالعه سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی نشان می‌دهد که سیستم‌های فتوولتائیک توانایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته را با راندمانی در حدود ۵ الی ۲۰ درصد دارند یعنی پانل فتوولتائیک بخش کمی از تشعشع جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، مابقی آن به صورت حرارت تلف می‌شود. سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی این انرژی حرارتی را که باعث افزایش دمای پانل می‌شود و راندمان آن را کاهش می‌دهد احیا کرده و مورد استفاده قرار می‌دهند.

سیستم فتوولتائیک یک انتخاب مناسب برای کمک به کشورها به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در سال‌های اخیر نصب سیستم‌های فتوولتائیک به طور متوسط در هر سال ۳۰٪ افزایش یافته‌است. دولتمردان ژاپنی انرژی خورشیدی را بخش مهمی از ترکیبات انرژی با هدف تولید ۱۰٪ الکتریسیته از سیستم‌های فتوولتائیک در سال ۲۰۳۰ قرار دادند [۱]. کرن و همکاران در سال ۱۹۷۸ اولین کسانی بودند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مفهوم اصلی سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی را که توسط دو سیال عامل آب و هوا عمل می‌کرد، ارائه نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از سیال عامل آب باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی می‌شود. زیرا که خواص ترموفیزیکی آب از هوا بیشتر است ولی استفاده از هوا به دلیل هزینه‌های ساختاری کمتر رایج است [۲]. بازلیان و همکاران در سال ۲۰۰۲ یک مدل عددی برای سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی در حالت جابجایی آزاد ارائه کردند. جابجایی آزاد هوای پشت پنل‌های PV که برای خنک‌کاری سیستم بکار می‌رفت، برای گرمایش محل مورد استفاده در ساختمان قرار می‌گرفت. این مدل که توسط نرم‌افزار EES مدل‌سازی شد توانایی استفاده از شرایط آب و هوایی برای کارکرد سالانه سیستم بود [۳]. جوشی و همکاران در سال ۲۰۰۷، راندمان سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی را به دو صورت انرژی و انرژی مورد بررسی قرار دادند. آنان راندمان انرژی را حدود ۵۵ الی ۵۶ درصد و راندمان انرژی را حدود ۱۲ الی ۱۵ درصد بیان کردند [۴]. تنو و همکارانش در سال ۲۰۱۲ یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی طراحی کردند و آن را مورد آزمایش قرار دادند برای خنک کردن فعال سلول‌های فتوولتائیک، یک آرایه‌ی موازی از کانال‌ها با منی‌فولد ورودی-خروجی جهت توزیع یکنواخت جریان هوا، طراحی و در پشت پنل PV وصل کردند. آزمایشات را با و بدون خنک کردن فعال انجام دادند. یک روند خطی بین دمای سلول و بازده به دست آمد بدون خنک کردن فعال، دمای مازول بالا بود $65^{\circ}C$ و سلول خورشیدی تنها می‌توانست به بازده ۹٪ برسد اما زمانی که پنل فتوولتائیک در شرایط خنک کردن فعال کار می‌کرد دما به صورت چشمگیری $65^{\circ}C$ کاهش پیدا کرد و بازده سلول خورشیدی به ۱۴٪ افزایش یافت. در این بررسی یک مدل شبیه‌سازی انتقال حرارت برای مقایسه با پروفایل دمای واقعی فتوولتائیک ایجاد شد که بین شبیه‌سازی و آزمایش توافق خوبی دیده شد [۵]. ری و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از سلول‌های فتوولتائیک-حرارتی به تأمین برق و نیاز آبگرم مصرفی یک مجموعه آموزشی با روش f چارت پرداختند. ذخیره انرژی را برای ماه‌های مختلف سال بدست آوردند [۶].

در این مقاله ابتدا با نوشتن معادلات موازنه انرژی و ضرایب انتقال حرارت، ضریب تلفات کلی سلول بدست می‌آید. سپس با وارد کردن پارامترهای طراحی برای سلول‌های فتوولتائیک-حرارتی و مخزن ذخیره حرارت به نرم‌افزار TRNSYS به شبیه‌سازی دینامیکی دمای سیال خروجی از سلول، دمای سلول، راندمان الکتریکی و حرارتی برای گرم‌ترین ماه سال پرداخته و عوامل موثر بر کاهش یا افزایش راندمان انرژی و انرژی مورد بحث قرار گیرد.

۲- مشخصات سلول فتوولتائیک-حرارتی

طراحی سیستم انرژی خورشیدی در ارتباط با بدست آوردن کمینه هزینه انرژی است. بنابراین طراحی کلکتور با بازدهی بالاتر نسبت به فن آوری موجود در صورتی که هزینه به طور اساسی کاهش یابد مطلوب به نظر می رسد. در هر صورت پیش بینی عملکرد سیستم خورشیدی ضروری بوده و هدف اصلی در این مقاله است. در این بخش یک سیستم فتوولتایی-حرارتی ساخت شرکت AnfaSolar شبیه سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی جهت بدست آوردن دمای سیال خروجی در قالب نمودار بیان می شود. اجزای مختلف سیستم و کلیه ضرایب انتقال حرارت در مقطع عرضی ارائه شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مدل سازی از یک پانل فتوولتایی نوع سیلیکونی پلی کریستالی که توان اسمی برابر با ۲۳۰ وات را داراست، استفاده شده است.



شکل (۱): اجزاء تشکیل دهنده سلول فتوولتائیک-حرارتی

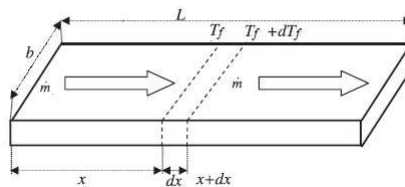
پانل ها بخشی از تشعشع رسیده را جذب می کنند که صرف تولید الکتریسیته و بالا رفتن دمای آنها می شود. تشعشع عبوری از پانل ها توسط کلکتور حرارتی جذب می شود. عبور سیال از میان پانل فتوولتایی و کلکتور از بالا رفتن دمای پانل ها جلوگیری کرده و باعث افزایش راندمان الکتریکی پانل ها می شود. دمای هوای عبوری از کانال های سیستم بر اثر جذب حرارت پانل فتوولتایی و کلکتور حرارتی، به واسطه انتقال حرارت جابجایی، افزایش می یابد. افزایش دمای سیال به افزایش راندمان حرارتی منجر می شود. پس با این نحوه طراحی می توان انرژی بر واحد سطح بیشتری به دست آورد. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود یک سلول فتوولتائیک-حرارتی از چند لایه با روش تکنولوژی ساخت Thin Film تشکیل شده است که لایه اول مربوط به پوشش شیشه ای، لایه دوم EVA¹ یک لایه پلاستیکی حاوی اتیلن وینیل استات است که سلول های فتوولتائیک را در محفظه ای قرار می دهد.

لایه سوم شامل سلول سیلیکونی، لایه چهارم باز فیلم نازکی از EVA، است. لایه پنجم به نام لایه Tedlar یا ورق پشت فتوولتائیک که نقش محافظت ماژول PV از اشعه UV، رطوبت و خوردگی را داراست. همچنین به عنوان یک عایق الکتریکی محسوب می شود. لایه های بعدی شامل قاب آلومینیومی و مجموعه کلکتورها است.

1-Ethylene Vinyl Acetate

۳- معادلات بقای انرژی

برای نوشتن معادلات بقای انرژی اجزای مختلف سیستم فتوولتائیک-حرارتی، المانی دیفرانسیلی به طول dx و به عرض b و به فاصله x از طول ورودی در نظر می‌گیریم. فرضیات مورد استفاده برای نوشتن معادلات انرژی عبارتست از: انتقال حرارت غیر دائم و یک بعدی، صرف نظر کردن از گرمای ویژه همه اجزا به جز سیال داخل کانال‌ها، یکسان در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت جابجایی میان سیال داخل کانال‌ها با پانل فتوولتایی، کلکتور حرارتی و جداره عایق و در نهایت تنوع درجه حرارت در طول ضخامت ناچیز گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن فرضیات فوق اکنون به ارائه روابط بقای انرژی برای اجزای مختلف سیستم می‌پردازیم. همانطوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود سلول فتوولتائیک-حرارتی شامل لایه‌های مختلف ایزولاسیون برای جلوگیری از آسیب بخش‌های مختلف تشکیل شده است.



شکل (۲): مقطع عرضی سلول فتوولتائیک-حرارتی

تعداد انرژی برای سلول فتوولتائیک برای تک تک عناصر به شرح زیر است ضمن اینکه پارامترهای هر رابطه به ترتیب از چپ به راست توضیح داده می‌شود [۷]:

$$\tau [a_c \beta_c I(t) + a_T (1 - \beta_c) I(t)] b dx = [U_t (T_c - T_a) + U_T (T_c - T_{bs})] b dx + \tau \eta_c I(t) \beta_c b dx \quad (۱)$$

میزان انرژی خورشیدی دریافت شده توسط سلول‌های خورشیدی پس از تابش میزان انرژی خورشیدی جذب شده توسط تدلار پس از انتقال از لایه اتیل وینیل استات میزان حرارت از دست رفته از سلول‌های خورشیدی به محیط از طریق پوشش شیشه‌ای انتقال حرارت کلی از سلول به سطح پشت تدلار میزان انرژی الکتریکی تولید شده از سلول‌های خورشیدی

با استفاده از معادله (۱) دمای سلول بدست می‌آید :

$$T_c = \frac{\tau [a_c \beta_c + a_T (1 - \beta_c) - a_c \eta \beta_c] I(t) + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \quad (۲)$$

تعداد انرژی برای سطح پشت Tedlar به شرح زیر است [۷]:

$$U_T (T_c - T_{bs}) b dx = h_T (T_{bs} - T_f) b dx \quad (۳)$$

انتقال حرارت کلی از سلول به سطح پشت Tedlar

نرخ انتقال حرارت از سطح پشت Tedlar به سیال

با استفاده از معادلات (۲) و (۳) برای دمای پشت صفحه PV داریم :

$$T_{bs} = \frac{h_{p1} \tau [a_c \beta_c + a_T (1 - \beta_c) - a_c \eta \beta_c] I(t) + U_{iT} T_a + h_T T_f}{U_{iT} + h_T} \quad (۴)$$

تعداد انرژی برای جریان سیال به شرح زیر است [۷]:

$$h_T(T_{bs} - T_f)bdx = m_f C_f \left(\frac{dT_f}{dx}\right)dx + U_b(T_f - T_a)bdx \quad (5)$$

نرخ انتقال حرارت از سطح پشت Tedlar به سیال

جریان سیال داخل کانال

نرخ انتقال حرارت از سیال به محیط

با انتگرال گیری از معادله (5) و با اعمال شرایط مرزی در $T_f = T_{fi}$ در $x=0$ می توان دمای متوسط سیال را

بدست آورد [۷]:

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx = \left[\frac{h_p h_{pv} (a\tau)_{eff} I(t)}{U_L} + T_a \right] \left[1 - \frac{\exp\left(\frac{-bU_L L}{m_f c_f}\right)}{\left(\frac{-bU_L L}{m_f c_f}\right)} \right] + T_{fi} \exp\left(\frac{-bU_L L}{m_f c_f}\right) \quad (6)$$

دمای خروجی سیال نیز با اعمال شرایط مرزی $T_f = T_{fo}$ در $x=L$ طبق رابطه زیر محاسبه می شود [۷]:

(۷)

$$T_{fo} = \left[\frac{h_p h_{pv} (a\tau)_{eff} I(t)}{U_L} + T_a \right] \left[1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{m_f c_f}\right) \right] + T_{fi} \exp\left(\frac{-bU_L L}{m_f c_f}\right)$$

دریافتی انرژی مفید کلکتور نیز طبق رابطه زیر بر حسب دمای ورودی و خروجی سیال صورت می گیرد [۷]:

$$\dot{Q}_u = m_f c_f (T_{fi} - T_{fo}) = \frac{m_f c_f}{U_L} \left[h_p h_{pv} (a\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{fi} - T_{fo}) \right] \left(1 - e^{\frac{-bU_L L}{m_f c_f}} \right) \quad (8)$$

ضمن اینکه رابطه‌ی بین پارامترهای طراحی به شرح زیر است [۷]:

$$U_t = \left[\frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1}$$

$$h_o = 5/\gamma + 3/\lambda V, V = 1(m s^{-1})$$

$$U_{iT} = \frac{U_t U_T}{U_t + U_T}$$

$$U_{iT} = \frac{U_{iT} h_t}{U_{iT} + h_t}$$

$$U_L = U_{iT} + U_b$$

$$h_{pv} = \frac{U_T}{(U_t + U_T)}$$

$$h_{pv} = \frac{h_T}{(U_t + U_T)}$$

$$(a\tau)_{eff} = \tau [a_c B_c + a\tau(1 - \beta_c) - \eta_c \beta_c]$$

۴- تعادل انرژی

انرژی دریافتی مفید سلول فتوولتائیک-حرارتی با استفاده از معادله‌ی دافی بکمن بر حسب دمای ورودی به سلول و دمای محیط طبق رابطه زیر است [۷]:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [h_p h_{pv} (\alpha \tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (9)$$

تعادل انرژی در اصل می‌گوید که دریافتی مفید در هر زمانی برابر اختلاف بین انرژی خورشیدی جذب شده و تلفات گرمایی از کلکتور مورد نظر است. تلفات به اختلاف دمای بین صفحه کلکتور و دمای محیط و یک ضریب اتلاف گرمایی وابسته است. با در نظر گرفتن یک ضریب، یک دمای کلکتور و یک دمای محیط (یعنی اتلاف گرمایی بر واحد سطح) یک مقدار تابش برخوردی برابر با تلفات وجود دارد. این مقدار تابش برخوردی تراز بحرانی تابش آن کلکتور تحت آن شرایط کاری است [۸]:

$$I(t) \geq \frac{U_L (T_{fi} - T_a)}{h_p h_{pv} (\alpha \tau)_{eff}} \quad (10)$$

۵- راندمان الکتریکی و حرارتی

راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک طبق رابطه (۵) تابعی از دمای آن است [۸]:

$$\eta_{el} = \eta_{ref} \cdot [1 - \beta_{ref} (T_c - T_a)] \quad (11)$$

که در آن η_{ref} بازده ماژول در دمای مرجع ۲۰ درجه سلیسوس و برابر با ۱۳/۹٪ همچنین β_{ref} ضریب دمای بازده ماژول که با توجه به انتخاب پنل های شرکت AnfaSolar در حدود ۰/۴۵٪ است. T_c دمای سلول و T_a دمای محیط است.

یک معیار ارزیابی عملکرد کلکتور، بازدهی کلکتور می‌باشد که به صورت نسبت دریافت مفید در طول یک مدت زمان مشخص به انرژی خورشیدی برخوردی در مدت زمان مشابه است [۸]:

$$\eta_{th} = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (12)$$

۶- راندمان انرژی و انرژی

راندمان انرژی طبق قانون دوم ترمودینامیکی شامل انرژی ورودی سیال، انرژی خروجی سیال و انرژی تلفات در سیستم است. برای انجام آنالیز انرژی بر روی سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی، راندمان‌های الکتریکی، حرارتی و مجموع مورد استفاده قرار می‌گیرند که برای سیستم مورد بررسی با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\sum \dot{E} x_{in} - \sum \dot{E} x_{out} = \sum \dot{E} x_{dest} \quad (13)$$

$$\sum \dot{E} x_{in} - (\dot{E} x_{in} - \dot{E} x_{work}) = \dot{E} x_{dest}$$

که برای انرژی ورودی با توجه به شدت تابش خورشید داریم:

$$\dot{E} x_{in} = \dot{E} x_{sun} = A_s \times I(t)_s \times \left[1 - \frac{4}{3} \times \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \times \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (14)$$

که در آن $I(t)$ شدت تابش برخوردی، A_s مساحت کلکتور، T_a دمای محیط و T_s دمای خورشید که برابر 5777K است.

همچنین انرژی سیال آب گرم داخل سیستم طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$Ex_{th} = \sum \left(1 - \frac{T_a + 273}{T_w + 273}\right) \times \dot{Q}_u \quad (15)$$

$$\dot{Q}_u = M_w C_w (T_w - T_a).$$

$$Ex_{work} = W = \eta \times I(t) \times A_s \quad (16)$$

که برای این روابط η راندمان الکتریکی سلول، M_w وزن مخزن، C_w ظرفیت سیال مخزن، T_w دمای مخزن، T_a دمای محیط و A_s مساحت کلکتور است. برای راندمان اگزرژی سیستم داریم [۹]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{Ex_{dest}}{Ex_{in}} \quad (17)$$

در این تحقیق جهت بدست آوردن راندمان انرژی یا همان راندمان کلی حرارتی و راندمان اگزرژی از دو رابطه زیر استفاده شده است [۹]:

$$\eta_{oth} = \frac{\eta}{0.38} + \eta_{th} \quad (18)$$

$$\eta_{oex} = \eta + \eta_{th} \left[1 - \frac{T_a + 237}{T_w + 237}\right] \quad (19)$$

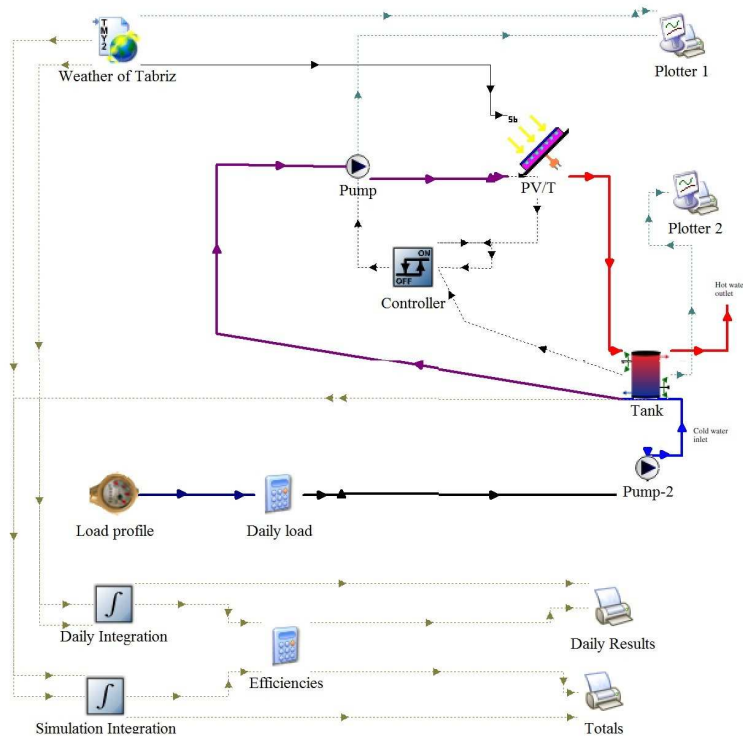
۶- مدل سازی سلول فتوولتائیک-حرارتی با استفاده از نرم افزار TRNSYS

در این بخش سیکل کاری سیستم فتوولتائیک-حرارتی، با استفاده از نرم افزار Trnsy مدل خواهد شد. مراحل انجام مدل سازی شامل وارد کردن اطلاعات آب و هوایی منطقه نمونه شهر تبریز، (باید توجه داشت که چون کلیه اطلاعات این نرم افزار اعم از دما و یا تابش به صورت ساعتی است لذا با انتگراسیون می توان اطلاعات روزانه و یا سالانه را بدست آورد) وارد کردن اطلاعات مربوط به سیستم فتوولتائیک-حرارتی، مخزن، پمپ و سیستم کنترل است. همچنین اطلاعات ورودی بار مصرفی بایستی با تعریف یک پروفایل مصرف به صورت ساعتی وارد نرم افزار شود. که در صورت نیاز به بررسی وارد نرم افزار می شوند.

با توجه به مشخصات الکتریکی و حرارتی سلول فتوولتائیک-حرارتی کلیه اطلاعات مربوط به ساختار پنل های پلی کریستالی ۲۳۰ واتی ساخت شرکت AnafSolar طبق جدول (۱) وارد نرم افزار می شوند. هدف از این بخش تحلیل دمای سیال خروجی از سلول فتوولتائیک-حرارتی، دمای سلول، راندمان الکتریکی و حرارتی، همچنین تحلیل اگزرژی سیستم با توجه به شرایط آب و هوایی اقلیم سردسیر تبریز است در سیستم کنترل به دو سنسور دما نیاز است که یک سنسور در پایین واحد ذخیره و یکی در محل خروجی سیال از کلکتور نصب شود. زمانی که دمای خروجی سیال از سلول فتوولتائیک-حرارتی از دمای متوسط مخزن بیشتر باشد پمپ روشن است در غیر این صورت خاموش است. خاموش و روشن شدن پیوسته پمپ هنگام صبح ممکن است به وقوع بپیوندد. زیرا سیال درون پمپ یا کانال های بین واحد ذخیره و کلکتور از دمای پایین مخزن خنک تر خواهد بود در نتیجه زمانی که پمپ روشن می شود مایع سرد وارد سلول فتوولتائیک-حرارتی شده که کنترل کننده پمپ را خاموش می کند تا وقتی که مایع درون کلکتور تا دمای مناسب گرم شود یا تابش برخوردی بیشتر از تراز بحرانی تابش شود، مجدداً پمپ را روشن می کند. شکل (۳) مدل طراحی سیکل را نمایان می کند. که شامل یک عدد سلول های فتوولتائیک-حرارتی، ۲ عدد پمپ سیرکلاسیون، یک عدد کنترلر دما و یک مخزن ذخیره حرارت است. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه، رفتار دینامیکی سیستم برای هر ساعت از سال قابل محاسبه است. ولی در این تحقیق رفتار دینامیکی سیستم، برای مرداد ماه مورد بررسی قرار می گیرد.

جدول (۱): مشخصات سلول فتوولتائیک-حرارتی و مخزن

علایم	مقدار	واحد	پارامترهای طراحی برای سلول فتوولتائیک-حرارتی و مخزن
α_c	۰/۹		ضریب جذب سلول فتوولتائیک
α_T	۰/۵		ضریب جذب لایه‌ی تدلار
τ	۰/۹۵		ضریب عبور
β	۰/۰۰۴۵		ضریب دمایی سلول فتوولتائیک
β_c	۰/۹		فاکتور بسته‌بندی سلول فتوولتائیک
h_{p1}	۰/۸۷		فاکتور پنالتی مربوط به پوشش شیشه‌ای مازول
h_{p2}	۰/۹۸		فاکتور پنالتی مربوط به لایه‌ی تدلار مازول
η_{ref}	%۱۳/۹		راندمان الکتریکی پائل فتوولتائیک در دمای مرجع
L	۱/۶	m	طول سیستم
b	۱	m	عرض سیستم
D	۰/۰۵	m	قطر کانال سیال
n	۱۹		تعداد کانال‌ها
A_c	۱/۴۶	m^2	مساحت کلکتور
\dot{m}	۰/۰۲	kg / s	دبی جرمی سیال
P_{max}	۲۳۰	W	ماکسیمم توان خروجی
c_f	۴/۱۹	KJ / Kg.K	ظرفیت گرمای ویژه سیال
C_w	۴/۱۹	KJ / Kg.K	ظرفیت گرمای ویژه مخزن
$(UA)_s$	۱۱/۱	W / K	حاصلضرب سطح در ضریب اتلاف مخزن
h_0	۱۰	W / m^2K	ضریب انتقال حرارت باد
h_f	۵۰۰	W / m^2K	ضریب انتقال حرارت داخلی لوله
l_G	۰/۰۰۳	m	ضخامت پوشش شیشه‌ای
l_c	۰/۰۰۰۳	m	ضخامت سلول فتوولتائیک
l_T	۰/۰۰۵	m	ضخامت لایه‌ی تدلار
K_G	۱	W / mK	ضریب هدایت حرارتی پوشش شیشه‌ای
K_c	۰/۰۳۹	W / mK	ضریب هدایت حرارتی سلول فتوولتائیک
K_T	۰۰۰۳۳	W / mK	ضریب هدایت حرارتی لایه‌ی تدلار
U_b	۰/۶۲	W / m^2K	ضریب تلفات از عایق به محیط اطراف
U_t	۹/۲۴	W / m^2K	ضریب تلفات از سلول فتوولتائیک به محیط از طریق شیشه
U_{iT}	۸/۱	W / m^2K	ضریب انتقال حرارت کلی از پوشش شیشه‌ای تا تدلار توسط سلول فتوولتائیک
U_T	۶۵	W / m^2K	ضریب انتقال حرارت سلول فتوولتائیک به سیال توسط لایه‌ی تدلار
h_T	۶۶	W / m^2K	ضریب انتقال حرارت از صفحه‌ی پشت تا سیال توسط لایه‌ی تدلار
$I(t)$	متغییر	W / m^2	شدت تابش ورودی
T_a	متغییر	°C	دمای محیط
T_c	متغییر	°C	دمای سلول
T_{fo}	متغییر	°C	دمای سیال خروجی
T_{fi}	متغییر	°C	دمای سیال ورودی



شکل (۳): طراحی سیکل توسط نرم افزار Trnsys

۱-۶- محاسبه میزان تشعشع خورشید

با استفاده از مدل پخش همسانگرد کل شار تشعشعی که به یک سطح شیبدار برای یک ساعت می‌رسد شامل سه بخش تابش مستقیم، تابش پخشی و تابش بازتابی است [۸]:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (20)$$

مجموعه تابش پخشی از آسمان و تابش بازتابی زمین روی سطح شیبدار، بدون توجه به جهت، یکسان می‌باشند سهم تابش مستقیم به عنوان $I_b R_b$ است. در واقع یک سطح با شیب β نسبت به افق دارای فاکتور دیدی به آسمان به صورت $\left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$ است، که اگر تابش پخشی همسانگرد باشد عبارت $I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right)$ سهم تابش

پخشی خواهد بود. سطح شیبدار دارای دیدی به زمین $\left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$ بوده و اگر محیط اطراف دارای یک ضریب

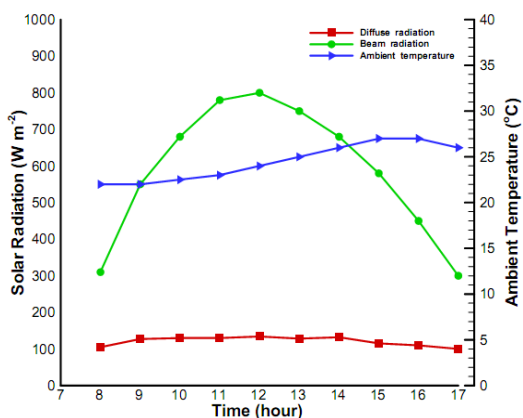
بازتاب ρ_g برای تابش کل خورشیدی باشد تابش بازتابی از محیط اطراف به روی سطح برابر $I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$

خواهد بود. ضریب انعکاس زمین اطراف است که صفحه گیرنده آن را می‌بیند. معمولاً ρ_g مقدار کوچک است، برای روزهای معمولی $\rho_g = 0.2$ و برای حالتی که مقابل صفحه گیرنده آب یا برف باشد، $\rho_g = 0.7$ انتخاب می‌گردد. که در این مقاله 0.5 در نظر گرفته شده است. همچنین R_b نسبت تابش مستقیم روی سطح شیبدار به تابش مستقیم روی سطح افقی برابر با [۸]:

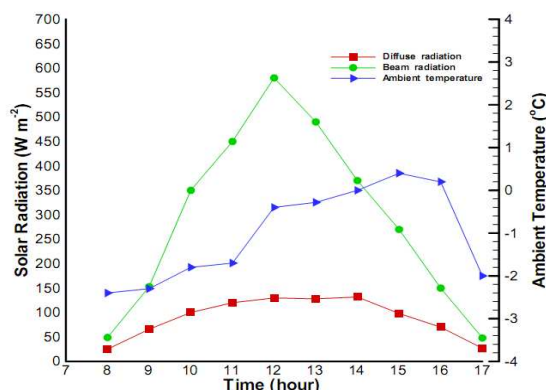
$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (21)$$

که در رابطه‌ی مزبور، ϕ عرض جغرافیایی بوده و برابر با 38 درجه، δ زاویه میل و β زاویه‌ی شیب پنل‌ها نسبت به سطح افقی است. با توجه به روابط اشاره شده میزان تشعشع خورشیدی عمود تابیده شده بر سطوح پنل‌ها با زاویه‌ی

نصب فصلی برای ۸۷۶۰ ساعت از سال توسط نرم‌افزار Tmsys محاسبه شده است. به عنوان مثال در شکل‌های (۴) و (۵) میزان تابش مستقیم و تابش پخشی و دمای محیط برای یک روز در زمستان و تابستان رسم شده است.



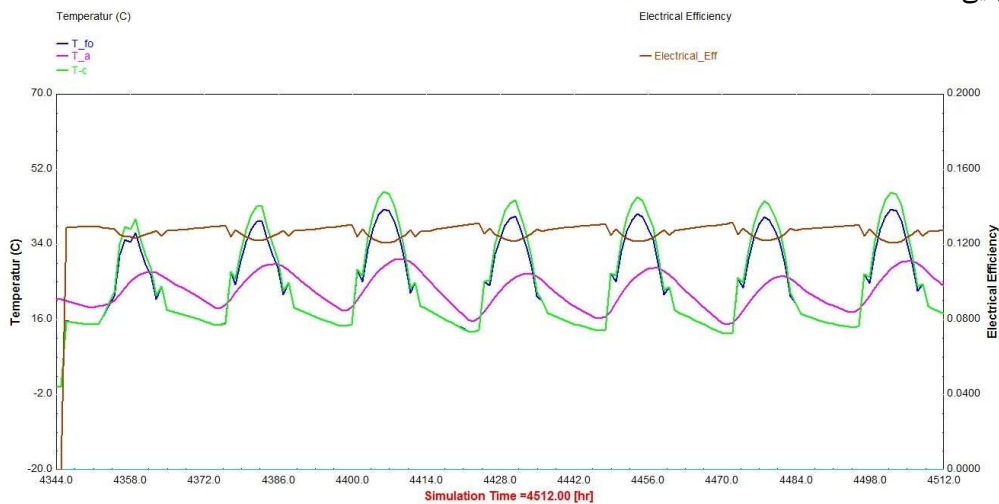
شکل (۵): تابش مستقیم، تابش پخشی و دمای محیط (روز اول ژوئیه)



شکل (۴): تابش مستقیم، تابش پخشی و دمای محیط (روز اول ژانویه)

۶-۲- بررسی رفتار دینامیکی سیستم

برای ارزیابی عملکرد سلول فتوولتائیک-حرارتی، دانستن ضریب تلفات کلی و ضریب داخلی انتقال حرارت سیال ضروری است. با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی برای سلول فتوولتائیک-حرارتی و مخزن ذخیره حرارت طبق جدول (۱)، ضریب اتلاف حرارت پانل فتوولتائیک به محیط اطراف $U_L = 7/6 (Wm^{-2}K^{-1})$ بدست می‌آید. طبق معادله (۱۱)، از جمله مشخصاتی که بر بازدهی پنل‌ها تاثیر مستقیمی می‌گذارد دمای سطح ماژول است. شکل (۶) مربوط به سیستم فتوولتائیک-حرارتی است که گویای این مطلب است که با افزایش دمای محیط و دمای سلول فتوولتائیک، برای هفته اول ماه گرم سال (ژوئیه) راندمان الکتریکی کاهش می‌یابد. ولی برای این سلول فتوولتائیک-حرارتی به علت خنک‌کاری توسط سیال عامل آب، کاهش راندمان به نسبت خیلی کمتر از سلول فتوولتائیک به تنهایی است.



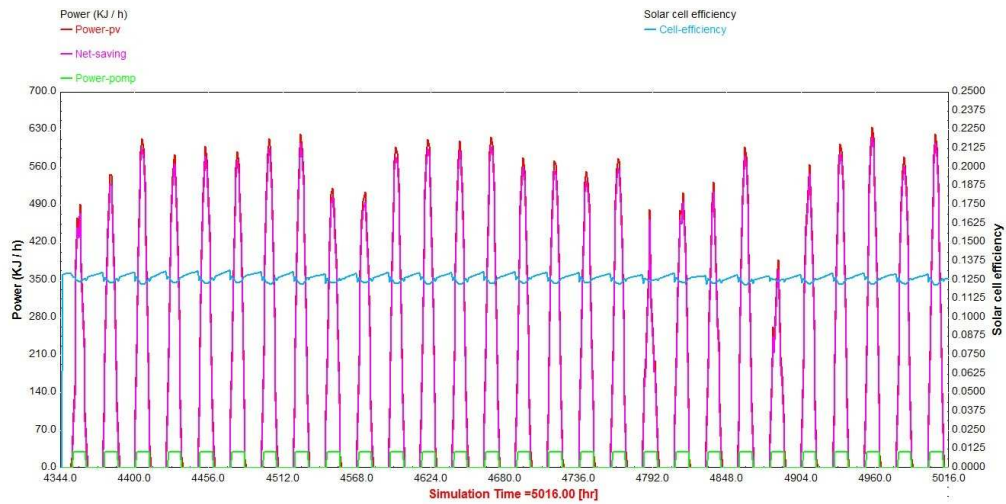
شکل (۶): افزایش دمای سلول فتوولتائیک-حرارتی با افزایش دمای محیط و کاهش راندمان الکتریکی

۳-۶- بررسی توان تولیدی سلول فتوولتائیک-حرارتی

با توجه به شکل (۷) توان ساعتی تولیدی سلول فتوولتائیک-حرارتی (PV-Power) و توان مصرفی پمپ سیرکلاسیون بین سلول فتوولتائیک-حرارتی و مخزن (Pomp Power)، همچنین توان خالص تولیدی (Net - saving) برای روز اول ژولای قابل مشاهده است. با توجه به کارکرد پمپ از ساعت ۸ الی ۱۸، نتایج حاکی از آن است که توان تولیدی سلول با افزایش شدت تابش برخوردی بین ساعات ۱ الی ۲ ظهر افزایش قابل چشمگیری دارد. هر چند راندمان الکتریکی با توجه به افزایش دما، کاهش می‌یابد ولی توان تولیدی همچنان در حالت ماکزیمم خود قرار دارد. همچنین نتایج مربوط به توان خالص تولیدی برای ماه ژولای در شکل (۸) قابل مشاهده است



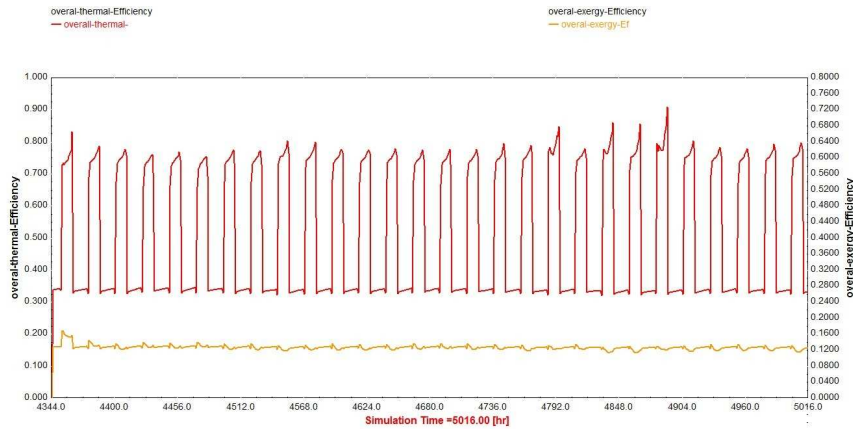
شکل (۷): توان تولیدی سلول، توان مصرفی پمپ و توان خالص تولیدی برای روز اول ژولای



شکل (۸): توان تولیدی سلول، توان مصرفی پمپ و توان خالص تولیدی برای ماه ژولای

۴-۶- بررسی طول سلول فتوولتائیک-حرارتی در راندمان کلی انرژی و انرژی

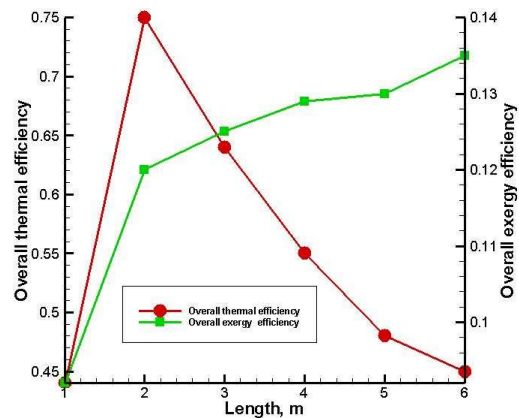
همانطور که در شکل های (۹) و (۱۰) مشاهده می شود با افزایش طول سلول فتوولتائیک-حرارتی، راندمان حرارتی کاهش اما راندمان انرژی با توجه به رابطه (۱۹) افزایش می یابد. نقطه بهینه در $L=2$ متر برای سلول فتوولتائیک-حرارتی همانطوری که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، بدست آمد.



شکل (۹): راندمان کلی انرژی و انرژی واکزرژی برای سلول فتوولتائیک-حرارتی با طول ۱.۶ متر



شکل (۱۰): راندمان کلی انرژی و انرژی واکزرژی برای سلول فتوولتائیک-حرارتی با طول ۶ متر

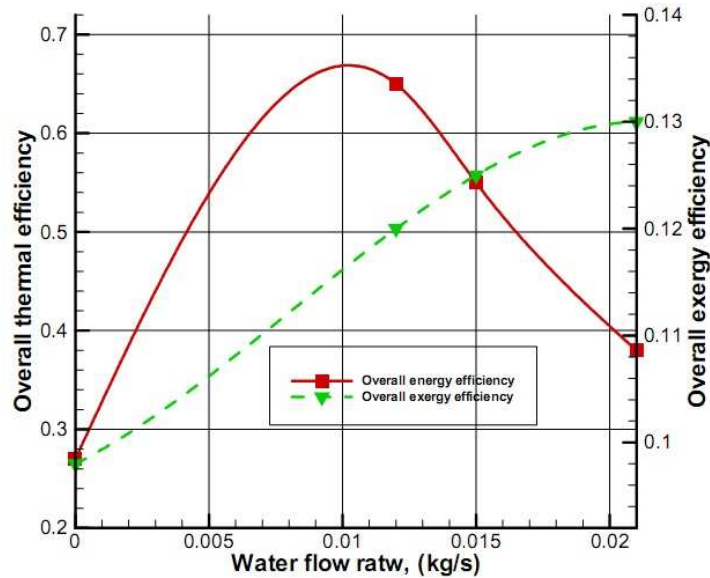


شکل (۱۱): اثر طول سلول فتوولتائیک-حرارتی بر راندمان کلی انرژی و انرژی

۵-۶- بررسی دبی سیال در راندمان کلی انرژی و انرژی

در این قسمت اثرات افزایش دبی سیال بر راندمان کلی انرژی و انرژی بررسی می‌شود. همانطوری که در شکل (۱۲) مشاهده می‌کنیم با افزایش دبی سیال راندمان انرژی افزایش ولی راندمان کلی انرژی برعکس آن کاهش

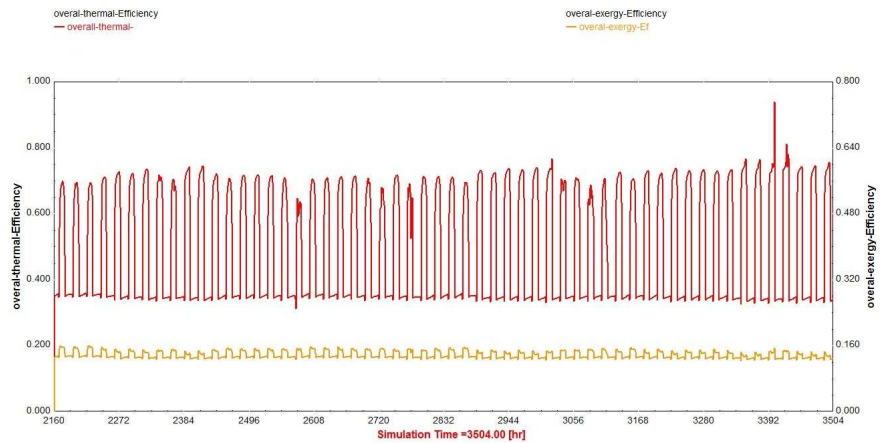
می‌یابد، راندمان کلی انرژی در ماکزیمم مقدار خود $m = 0.01 \text{ kg/s}$ را دارد. لذا حالت بهینه را در $m = 0.01 \text{ kg/s}$ انتخاب می‌کنیم.



شکل (۱۲): اثر افزایش دبی بر راندمان کلی انرژی و انرژی

۶-۶- محاسبه راندمان انرژی و انرژی برای سیستم مورد نظر

راندمان سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی را به دو صورت انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفت. برای ۶ ماهه اول، راندمان انرژی حدود ۳۵ الی ۷۰ درصد و راندمان انرژی را حدود ۱۱ الی ۱۳ درصد بدست آمد.



شکل (۱۲): راندمان کلی انرژی و انرژی برای ۶ ماه اول بهار و تابستان

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق با مدل سازی یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی با استفاده از نرم افزار TRANSYS رفتار دینامیکی دمای سیال خروجی از سلول فتوولتائیک-حرارتی، دمای سلول، بازده الکتریکی، بازده حرارتی تحلیل شده و عوامل موثر بر افزایش راندمان انرژی و انرژی بررسی شد. نتایج حاصل از تغییرات دبی سیال نشان داد که حالت بهینه دبی

سیال وقتی راندمان انرژی و انرژی بیشترین مقدار خود را دارد در $m = 0.01 \text{ kg/s}$ صورت می گیرد. همچنین با افزایش طول سلول فتوولتائیک-حرارتی راندمان انرژی کاهش ولی راندمان انرژی افزایش می یابد. که $L = 2m$ به عنوان طول بهینه در نظر گرفته شد. مدل سازی برای گرم ترین روز سال و ماه نشان داد توان تولیدی سلول فتوولتائیک-حرارتی با شدت تابش خورشیدی رابطه مستقیم دارد و نزدیک ظهر توان تولیدی به ۱۸۰ وات می رسد. راندمان سیستم های فتوولتائیک-حرارتی را به دو صورت انرژی و انرژی مورد بررسی قرار گرفت. راندمان انرژی را حدود ۳۵ الی ۷۰ درصد و راندمان انرژی را حدود ۱۱ الی ۱۳ درصد بدست آمد.

مراجع:

- [1]- New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), 2004, Overview of "PV Roadmap Toward 2030". Japan, Tokyo.
- [2]- Kern. C., Russell. M.C., 1978. "Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector Systems." In Proceedings of the 13th IEEE PV Specialist Conference, Washington, DC. 5-8. p. 1153-7.
- [3]- Bazilian. M, Prasad, D., 2002. "Modelling of a Photovoltaic Heat Recovery System and its Role in a Design Decision Support Tool for Building Professionals." Renewable Energy 27, 57-68.
- [4]- Joshi .A, Tiwari. A., 2007. "Energy and Exergy Efficiencies of a Hybrid Photovoltaic- Thermal Air Collectors." Renewable Energy 32, 2223-2241.
- [5]- Teo .H.G., Lee . P.S., M.N.A. Hawlader, 2012, "An active cooling system for photovoltaic modules", Applied Energy 90 .309-315.
- [6]- Rey.D., Manuel.B, Francisco.C, Fernandez.A, 2009. "Solar mixed thermal and photovoltaic installation for an infantile educational-sanitary lodging in Senkata-El Alto (BOLIVIA) ." International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREQP'09)
- [7]- S., Agrawal, G., Tiwari, 2011, "Performance evaluation of hybrid modified micro-channel solar cell thermal tile", Vol. 3, No. 1, 2011, pp. 244-254.
- [8]- Duffie. J. A, Beckman. W. A, Solar Engineering of Thermal Processes Wiley, Interscience, University of Wisconsin-Madison, 1980.
- [9]- Hepbasli A. Exergetic modelling and assessment of solar assisted domestic hot water tank integrated ground-source heat pump systems for residences. Energy Build 2007;39:1211-7.

Energy and exergy analysis of Thermal-photovoltaic cells with TRANSYS modeling and factors of affecting their

Elgar athari ¹, Farshad Torabi ², Ahmad Tavasoli

1-elgar.athari@gmail.com

2-ftorabi@kntu.ac.ir

Abstract

Performance of Thermal-photovoltaic cells affected by various parameters such as temperature. Also evaluate the performance of Thermal-photovoltaic cells, it's essential to know the overall losses rate that is dependent on weather conditions. In this study with modeling of the Thermal- photovoltaic system with TRANSYS Software, the Dynamic outlet fluid temperature of Thermal-photovoltaic cells, cell temperature, electrical efficiency, thermal efficiency and exergy analysis and factors influencing energy efficiency will be investigated.

Results showed that the optimal flow rate $m = 0.01 \text{ kg/s}$ occurs when the energy and exergy efficiency has its maximum value. Also with increasing the length's of Thermal-photovoltaic cell, energy efficiency reduces while the thermal exergy efficiency increases. So considered $L = 2m$ as the optimal length. Modeling the warmest day, showed the generated power of photovoltaic cells has a direct relationship with Thermal solar radiation intensity, And 180 watts can be produced at noon. The efficiency of thermal photovoltaic systems are investigated in two ways, energy and exergy. Approximately reach %35 to %70 energy efficiency and exergy efficiency of about %11 to %13 respectively.

Keywords: Thermal-Photovoltaic cell, energy balance, heat transfer coefficients, energy and exergy efficiency