



بهینه سازی گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک خورشیدی

محسن مهدوی عادل، فرامرز سرحدی و سعید فراحت

2- افزایش راندمان مدول فتوولتائیک به دلیل جذب حرارت از سطح آن توسط سیال جاری در گردآورنده خورشیدی.

در یک سیستم تهویه خورشیدی، PV/T به عنوان اصلی ترین جزء سیستم می باشد. از این رو بررسی عملکرد بهینه آن که در عملکرد کل سیستم تأثیر بسزایی دارد، اهمیت می یابد. از سوی دیگر هزینه یک وات توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم های فتوولتائیک خورشیدی حدود هفت دلار و دوره بازپرداخت سرمایه گذاری روی چنین سیستم هایی در حدود 10-15 سال می باشد. پس منطقی است که سیستم فتوولتائیک خورشیدی در حالت بهینه خود کار کند. همچنین راندمان کلی یک PV/T به پارامترهای هندسی، حرارتی، الکتریکی و مجموعه ای از شرایط محیطی و جوی وابسته است. اگر پارامترهای مذکور بهینه نباشند راندمان کلی PV/T به شدت کاهش می یابد. بنابراین ملاحظه این مقاله روی تحلیل مفصل حرارتی و الکتریکی PV/T به منظور ارزیابی عملکرد بهینه آن می باشد تا مقادیر پارامترهای طراحی و عملکردی که راندمان کلی PV/T را حداکثر می کنند یافت شوند. تحقیقات زیادی در خصوص بررسی عملکرد PV/T انجام شده است. بارگاوا و همکاران در سال 1991 یک سیستم پیوندی² متشکل از گردآورنده هوایی خورشیدی و سلول های فتوولتائیک خورشیدی را تحلیل کردند و مساحت بهینه سلول های خورشیدی لازم جهت تأمین توان پمپ الکتریکی در سیستم گردآورنده هوایی را محاسبه کردند. آن ها از یک رابطه خطی ساده برای محاسبه راندمان الکتریکی سلول های خورشیدی استفاده کردند [1]. هگازی در سال 2000 به مقایسه عملکرد حرارتی و الکتریکی چهار نوع مختلف از گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک پرداخت و تأثیر دبی جریان هوا، نوع صفحه جاذب و سلول های فتوولتائیک را روی عملکرد PV/T بررسی کرد. مطالعات وی اطلاعات ارزشمندی درباره طراحی و عملکرد انواع PV/T در

چکیده - در مقاله حاضر، گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک (PV/T) خورشیدی¹ بهینه سازی شده اند. بدین منظور مدل ریاضی جامعی از شرایط عملکرد حرارتی و الکتریکی PV/T استفاده شده است. در این مدل اغلب پارامترهای هندسی، حرارتی، الکتریکی، شرایط عملکردی، ضریب اتلاف حرارت کلی و سایر ضرایب انتقال حرارت PV/T به عنوان متغیر می باشند. برخلاف مدل های ارائه شده موجود، این مدل علاوه بر پیش بینی پارامترهای حرارتی، قادر به پیش بینی پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره می باشد. پس از این مدل سازی، راندمان کلی PV/T بدست آمده است. یک برنامه شبیه ساز کامپیوتری جهت انجام محاسبات حرارتی و الکتریکی توسعه داده شده است. نتایج این برنامه در توافق خوبی با داده های تجربی گذشتگان می باشد. در انتها بهینه سازی PV/T صورت گرفته است و مقادیر بهینه مساحت سطح PV/T و سرعت ورودی جریان سیال برای حداکثر شدن راندمان کلی PV/T در یکسری از شرایط جوی و طراحی نمونه یافت شده اند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف طراحی و عملکردی بر راندمان کلی PV/T بررسی شده است. علاوه بر افزایش دقت نتایج، حالت کارکرد بهینه PV/T نتیجه شده است.

واژه های کلیدی - بهینه سازی، شبیه سازی کامپیوتری، انرژی تجدید پذیر، گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی.

1- مقدمه

یک گردآورنده حرارتی فتوولتائیک خورشیدی (PV/T) نوعی مبدل گرمایی است که انرژی تابش خورشیدی را دریافت و به انرژی الکتریکی و حرارتی تبدیل می کند. PV/T ها نسبت به گردآورنده های خورشیدی معمولی دارای مزایای زیر می باشند:

1- استفاده از فضای بهینه نصب به دلیل ترکیب گردآورنده خورشیدی و مدول فتوولتائیک در یک سیستم واحد؛

محسن مهدوی عادل، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان،
mohsen.mahdaviadeli@gmail.com
فرامرز سرحدی، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان،
fsarhaddi@eng.usb.ac.ir
سعید فراحت، دکتری مهندسی مکانیک - کاربرد کامپیوتر، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان،
farahat@hamoon.usb.ac.ir

¹ Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Collectors
² Hybrid.

همکاران در سال 2009 به بررسی آزمایشگاهی عملکرد حرارتی و شبیه‌سازی کامپیوتری دو نوع مختلف از PV/T های هوایی پرداختند. PV/T های مورد مطالعه از نوع مدول فتوولتائیک شیشه-تدلار و شیشه-شیشه می‌باشند. آن‌ها عباراتی تحلیلی برای دمای مدول خورشیدی، دمای صفحه زیرین مدول خورشیدی، دمای هوای خروجی و حرارت مفید جذب‌شده برای هر دو نوع PV/T بدست آوردند و نشان دادند که PV/T با مدول فتوولتائیک شیشه-شیشه عملکرد بهتری دارد. در تحقیق ایشان علاوه بر ثابت بودن ضریب اتلاف کلی و سایر ضرایب انتقال حرارت، عدم در نظر گرفتن انتقال حرارت تابشی به آسمان، راندمان الکتریکی سلول خورشیدی تابعی خطی از دمای سلول خورشیدی در گرفته شده است [7]. در سال 2009 چو و همکاران تحلیل انرژی و اکسرژی دو نوع PV/T مایعی را بر مبنای یک مدل شبیه‌ساز دینامیک انجام دادند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. یکی از PV/T های مورد مطالعه دارای پوشش شیشه‌ای و دیگری بدون پوشش می‌باشد. تحقیق ایشان نشان می‌دهد برای حرارت خروجی بیشتر PV/T با پوشش شیشه‌ای بهتر می‌باشد ولی از دیدگاه اکسرژی جهت افزایش راندمان الکتریکی PV/T بدون پوشش مناسب‌تر است. مانند تحقیقات قبل آن‌ها نیز راندمان الکتریکی سلول خورشیدی را تابعی خطی از دمای سلول خورشیدی در نظر گرفته‌اند [8]. نویسندگان مقاله حاضر در تحقیقات قبلی‌شان انواع مختلفی از گردآورنده‌های خورشیدی متداول را بهینه‌سازی کرده‌اند [9-11].

در مطالعات قبلی موارد زیر در نظر گرفته نشده‌اند [1-11]:

- 1- یک شبیه‌سازی کامپیوتری جامع از عملکرد حرارتی و الکتریکی PV/T که کلیه پارامترهای حرارتی مانند دمای سطح مدول خورشیدی، دمای صفحه زیرین مدول، دمای سیال خروجی، حرارت مفید جذب‌شده و غیره و پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را در بر بگیرد انجام نشده‌است؛
- 2- برای محاسبه راندمان الکتریکی PV/T از رابطه‌ای ساده که تابعی خطی از دمای مدول خورشیدی و یا شدت تابش خورشید می‌باشد استفاده شده‌است که این رابطه جزئیات تغییر پارامترهای الکتریکی را نشان نمی‌دهد؛
- 3- اغلب ضرایب انتقال حرارت همچون ضریب اتلاف حرارت کلی، ضریب انتقال حرارت در مجرای جریان، خواص سیال و غیره ثابت در نظر گرفته شده‌اند و یا ضریب انتقال حرارت تابشی به آسمان را صرف نظر کرده‌اند؛
- 4- بهینه‌سازی کلی PV/T نسبت به شرایط عملکردی و طراحی صورت نگرفته‌است. شرایط طراحی شامل مساحت سطح PV/T و شرایط عملکردی شامل سرعت سیال ورودی می‌شود؛

اختیار گذاشته‌است. در کار ایشان علاوه بر ثابت در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت مربوطه، راندمان الکتریکی سلول خورشیدی به صورت رابطه‌ای خطی از دمای سلول خورشیدی در نظر گرفته شده‌است [2]. جی و همکاران در سال 2003 یک مدل حرارتی محاسباتی برای تحلیل عملکرد سیستم PV/T دیواری در یک ساختمان استفاده کردند و نشان دادند عملکرد سیستم مذکور بسیار بهتر از گردآورنده خورشیدی متداول است. آن‌ها توان خروجی از مدول PV را تابعی درجه 2 از شدت تابش خورشیدی و دمای مدول خورشیدی در نظر گرفتند اما این رابطه جزئیات پارامترهای الکتریکی سیستم مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را در اختیار نمی‌گذارد [3]. زاخارچنکو و همکاران در سال 2004 عملکرد چندین پنل فتوولتائیک مختلف را در سیستم PV/T به طور تجربی بررسی نمودند و راندمان‌های حرارتی و الکتریکی بالاتری را نسبت به سیستم‌های متداول گزارش کردند ولی آن‌ها شبیه‌سازی کامپیوتری انجام ندادند [4]. تایواری و سودها در سال 2007 عملکرد کلی چندین نوع مختلف PV/T هوایی را بررسی نمودند. آن‌ها عباراتی بر حسب پارامترهای جوی و طراحی برای دمای مدول فتوولتائیک خورشیدی، دمای صفحه زیرین مدول خورشیدی، دمای هوای خروجی و حرارت مفید جذب‌شده در PV/T بدست آوردند. یک اعتبارسنجی آزمایشگاهی برای مدل حرارتی PV/T بدون کاور انجام دادند و از مقایسه نتایج مدل‌ها مشاهده کردند که PV/T بدون کاور و بدون تدلار³ عملکرد بهتری دارد. آن‌ها در مدل‌سازی حرارتی از انتقال حرارت تابشی به آسمان صرف نظر کرده‌اند و اغلب ضرایب انتقال حرارت مانند ضریب اتلاف بالا، ضریب انتقال حرارت در مجرای جریان و غیره را ثابت در نظر گرفته‌اند. همچنین برای محاسبه عملکرد الکتریکی مدول خورشیدی از رابطه‌ای خطی بر حسب دمای مدول خورشیدی استفاده کرده‌اند که این رابطه تغییرات پارامترهای الکتریکی مدول خورشیدی مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را بر حسب تغییرات داده‌های جوی نشان نمی‌دهد [5]. دویی و تایواری در سال 2008 به مدل‌سازی و بررسی آزمایشگاهی عملکرد PV/T مایعی پرداختند و بیانی تحلیلی برای معادله مشخصه گردآورنده بر حسب پارامترهای جوی و طراحی بدست آوردند و نشان دادند که راندمان کلی PV/T نسبت به گردآورنده معمولی بیشتر است. آن‌ها ضریب اتلاف کلی و سایر ضرایب انتقال حرارت را ثابت در نظر گرفتند، انتقال حرارت تابشی به آسمان را صرف نظر کردند و راندمان الکتریکی سلول خورشیدی را تابعی خطی از دمای سلول خورشیدی در نظر گرفتند [6]. جوشی و

³ Tedlar.

در اینجا $\tau_G, \alpha_T, \alpha_c, dx, b, G, T_{bs}, T_{amb}, T_{cell}$ و η_{el} به ترتیب دمای سلول خورشیدی، دمای محیط، دمای سطح زیرین تدار، شدت تابش خورشیدی، عرض گردآورنده، المانی از مجرای جریان، ضریب جذب سلول خورشیدی، ضریب جذب تدار، ضریب انتقال شیشه و راندمان الکتریکی می باشند. همچنین β_c ضریب تراکم سلول خورشیدی بوده که درصد سطح سلول خورشیدی را نسبت به ماده EVA در سطح مدول فتوولتائیک نشان می دهد. U_T ضریب انتقال حرارت هدایتی از سلول خورشیدی به جریان سیال از طریق تدار می باشد و به صورت زیر معرفی می گردد:

$$U_T = [L_T/K_T + L_{si}/K_{si}]^{-1} \quad (2)$$

L_T و K_T به ترتیب ضخامت و ضریب هدایت تدار می باشند. U_t ضریب انتقال حرارت کلی از سلول خورشیدی به محیط از طریق پوشش شیشه ای PV/T می باشد و شامل عبارات زیر می باشد:

$$U_t = [L_G/K_G + 1/h_{conv,t} + 1/h_{rad}]^{-1} \quad (3)$$

L_G و K_G به ترتیب ضخامت و ضریب هدایت شیشه می باشند. ضریب انتقال حرارت جابجایی از سطح بالای PV/T به محیط توسط رابطه زیر محاسبه می شود [12]:

$$h_{conv,t} = 2.8 + 3V_w \quad (4)$$

در معادله قبل V_w سرعت باد در سطح بالای PV/T می باشد. h_{rad} ضریب انتقال حرارت تابشی از سطح بالای PV/T به آسمان می باشد که در تحقیقات قبلی صرف نظر شده است. این ضریب از رابطه زیر محاسبه می شود [13]:

$$h_{rad} = \epsilon_G \sigma (T_{sky} + T_{cell})(T_{sky}^2 + T_{cell}^2) \quad (5)$$

در اینجا T_{sky}, ϵ_G و σ به ترتیب دمای آسمان، ضریب صدور شیشه و ثابت استفان-بولتزمن⁴ می باشند. دمای آسمان از رابطه زیر محاسبه می شود [13]:

$$T_{sky} = T_{amb} - 6 \quad (6)$$

تعداد انرژی برای سطح زیرین تدار:

$$U_T (T_{cell} - T_{bs}) b dx = h_f (T_{bs} - T_f) b dx \quad (7)$$

در معادله قبل، T_f دمای سیال درون مجرای جریان می باشد و h_f ضریب انتقال حرارت جابجایی در مجرای جریان می باشد که در مطالعات گذشته ثابت در نظر گرفته شده است ولی در این تحقیق با توجه به رژیم جریان و عدد نوسلت جریان محاسبه می شود.

تعداد انرژی برای سیال جاری در زیر تدار:

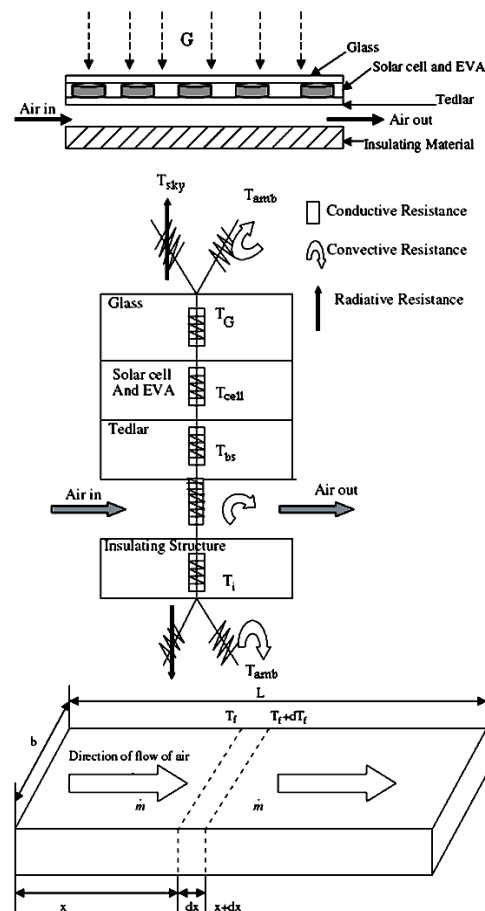
$$h_f (T_{bs} - T_f) b dx = \rho C_p (dT_f/dx) dx + U_b (T_f - T_{amb}) b dx \quad (8)$$

⁴ Stefan-Boltzmann Constant

5- برخی از این سیستم ها، گردآورنده PV/T نمی باشند [9-11]. در این مقاله فرایندی برای طراحی و بهینه سازی گردآورنده های حرارتی فتوولتائیک خورشیدی توسعه داده شده است. ابتدا تحلیل حرارتی و الکتریکی PV/T انجام می شود. سپس راندمان کلی PV/T بدست می آید و در انتها بهینه سازی PV/T صورت می گیرد و مقادیر بهینه برخی از پارامترهای طراحی و عملکردی که راندمان کلی PV/T را حداکثر می کنند یافت می شوند.

2- تحلیل حرارتی

جهت اختصار از آوردن اثبات روابط حاکم بر عملکرد حرارتی PV/T خودداری می شود. در این روابط اغلب پارامترهایی که می توانند تغییر کنند به عنوان متغیر فرض می شوند. شکل (1) نمای شماتیک مقطع PV/T، مدار مقاومت حرارتی معادل آن و المان dx از مجرای جریان را نشان می دهد.



شکل 1- مدار مقاومت حرارتی معادل PV/T [5].

با نوشتن تعداد انرژی برای اجزاء مختلف PV/T پارامترهای حرارتی و راندمان حرارتی آن بدست می آیند [5,7]:
تعداد انرژی برای مدول PV شیشه-تدار:

$$\tau_G [\alpha_c \beta_c G + \alpha_T (1 - \beta_c) G] b dx = \tau_G \beta_c \eta_{el} G b dx + [U_t (T_{cell} - T_{amb}) + U_T (T_{cell} - T_{bs})] b dx \quad (1)$$

$$T_{f,out} = \left(T_{amb} + \frac{h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G}{U_L} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \right) + T_{f,in} \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \quad (22)$$

در اینجا L طول مجرای جریان می باشد. دما متوسط سیال عامل در مجرای جریان به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_f(x) dx = \left[T_{amb} + \frac{h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G}{U_L} \right] \times \left[1 - \left(1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \right) \right] / \left(\frac{bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) + T_{f,in} \left[1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \right] / \left(\frac{bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \quad (23)$$

نرخ حرارت مفید جذب شده در PV/T از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\dot{Q}_u = \frac{\dot{m}C_p}{U_L} \left[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G - U_L(T_{f,in} - T_{amb}) \right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (24)$$

راندمان حرارتی PV/T به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{bLG} = \frac{\dot{m}C_p}{bLU_L} \left[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} - \frac{U_L(T_{f,in} - T_{amb})}{G} \right] \times \left[1 - \exp\left(\frac{-bU_L L}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (25)$$

3- تحلیل الکتریکی

ظهور پارامتر راندمان الکتریکی (η_{el}) در معادله (13) تحلیل حرارتی PV/T را به تحلیل الکتریکی مدول فتوولتائیک وابسته می کند. در تحقیقات گذشته راندمان الکتریکی از رابطه زیر محاسبه شده است [14]:

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} [1 - 0.0045(T_{cell} - T_{amb,ref})] \quad (26)$$

اندیس ref مقادیر پارامترها را در شرایط مرجع نشان می دهد و مقادیر مرجع توسط سازندگان مدول های خورشیدی داده می شوند. رابطه (26) یک تابع خطی از دمای سطح مدول فتوولتائیک خورشیدی بوده و جزئیات تغییرات پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را بیان نمی کند. ولی در این تحقیق، راندمان الکتریکی از شبیه سازی مدول فتوولتائیک خورشیدی محاسبه می شود که می تواند تغییرات پارامترهای الکتریکی را نسبت به تغییر پارامترهای عملکردی، محیطی و طراحی به خوبی پیش بینی کند.

در اینجا C_p و \dot{m} به ترتیب ظرفیت حرارتی و دبی جرمی سیال می باشند. دبی جرمی جریان سیال به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{m} = \rho V_{in} (b\delta), \quad (9)$$

که V_{in} و $(b\delta)$ به ترتیب سرعت متوسط سیال در ورود به PV/T و سطح مقطع مجرای جریان می باشند. U_b ضریب انتقال حرارت کلی از پایین PV/T به محیط از طریق عایق زیرین می باشد و شامل عبارات زیر می باشد:

$$U_b = [L_i/K_i + 1/h_{conv,b}]^{-1} \quad (10)$$

در این معادله L_i ، K_i و $h_{conv,b}$ به ترتیب ضخامت عایق، ضریب هدایت عایق و ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطح زیرین PV/T می باشند. از حل معادلات (1) و (7) عباراتی برای دمای سطح مدول فتوولتائیک خورشیدی و دمای سطح زیرین تدلار به صورت زیر بدست می آید:

$$T_{cell} = \frac{(\alpha\tau)_{eff}G + U_t T_{amb} + U_T T_{bs}}{U_t + U_T} \quad (11)$$

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}(\alpha\tau)_{eff}G + U_{tT} T_{amb} + h_f T_f}{U_{tT} + h_f} \quad (12)$$

که در این معادلات:

$$(\alpha\tau)_{eff} = \tau_G [\alpha_c \beta_c + \alpha_T (1 - \beta_c) - \beta_c \eta_{el}] \quad (13)$$

$$h_{p1} = U_T / (U_T + U_t) \quad (14)$$

$$U_{tT} = [1/U_t + 1/U_T]^{-1} = U_t U_T / (U_T + U_t) \quad (15)$$

از جایگذاری معادله (12) در معادله (8)، یک معادله دیفرانسیل معمولی برای دمای سیال در مجرای جریان بدست می آید:

$$\frac{dT_f}{dx} + \left(\frac{bU_L}{\dot{m}C_p} \right) (T_f - T_{amb}) = \frac{bh_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G}{\dot{m}C_p} \quad (16)$$

که در آن:

$$h_{p2} = h_f / (U_{tT} + h_f) \quad (17)$$

$$U_{tT} = [1/h_f + 1/U_{tT}]^{-1} = U_{tT} h_f / (U_{tT} + h_f) \quad (18)$$

$$U_L = U_b + U_{tT} \quad (20)$$

ضریب اتلاف حرارت کلی (U_L) در تحقیقات قبلی ثابت در نظر گرفته شده است، در صورتی که ثابت نبوده و از مدل سازی انتقال حرارت جابجایی و تابشی بین سطوح PV/T و محیط بدست می آید. از حل معادله دیفرانسیل (16) توزیع دمای سیال بر حسب طول مجرای جریان به صورت زیر بدست می آید:

$$T_f(x) = \left(T_{amb} + \frac{h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff}G}{U_L} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{-bU_L x}{\dot{m}C_p} \right) \right) + T_{f,in} \exp\left(\frac{-bU_L x}{\dot{m}C_p} \right) \quad (21)$$

معادله (21) دمای سیال خروجی از PV/T را به صورت زیر می دهد:

برای بدست آوردن ولتاژ و جریان در دما و شدت تابش های دیگر از معادلات کمکی انتقال زیر استفاده می شود [15,16]:

$$T_{cell} = T_{amb} + G (NOCT - 293.15) / 800, \quad (33)$$

$$a/a_{ref} = T_{cell} / T_{cell,ref}, \quad (34)$$

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_{cell}}{T_{cell,ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{\varepsilon N_c}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_{cell,ref}}{T_{cell}} \right) \right) \quad (35)$$

$$I_L = G/G_{ref} [I_{L,ref} + \alpha(T_{cell} - T_{cell,ref})], \quad (36)$$

$$\Delta T = T_{cell} - T_{cell,ref}, \quad (37)$$

$$\Delta I = \alpha(G/G_{ref})\Delta T + (G/G_{ref} - 1)I_{sc,ref}, \quad (38)$$

$$\Delta V = \beta\Delta T - R_s\Delta I, \quad (39)$$

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I, \quad (40)$$

$$V_{new} = V_{ref} + \Delta V. \quad (41)$$

در اینجا ε ، N_c ، $NOCT$ ، α و β به ترتیب انرژی شکاف باند¹⁰ (برای سلول سیلیکون $1.12eV$)، تعداد سلول ها در مدول خورشیدی، دمای اسمی کارکرد سلول خورشیدی و ضرایب دمایی جریان و ولتاژ می باشند. شرایط مرجع و مقادیر این پنج پارامتر توسط سازندگان مدول های خورشیدی داده می شوند [17]. مقادیر جدید ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم، از حداکثر مساحت مستطیل زیر منحنی مشخصه در شرایط جدید حاصل می شود. راندمان الکتریکی آرایه فتوولتائیک خورشیدی توسط رابطه زیر داده می شود [7,5]:

$$\eta_{el} = V_{mp} I_{mp} / S_{eff}, \quad (42)$$

$$S_{eff} = (N_s N_m A_{mod}) G = A_{arr} G. \quad (43)$$

در روابط قبل S_{eff} ، A_{arr} ، N_s و N_m به ترتیب تابش خورشیدی مؤثر، مساحت سطح آرایه فتوولتائیک خورشیدی، مساحت سطح مدول خورشیدی، تعداد رشته ها و تعداد مدول ها در هر رشته می باشند.

راندمان حرارتی کلی سیستم PV/T به صورت زیر تعریف می شود [7]:

$$\eta_{ov} = \frac{\eta_{el}}{0.36} + \eta_{th}. \quad (44)$$

کیفیت انرژی الکتریکی به مراتب بیشتر از انرژی حرارتی می باشد. ضریب $0/36$ یک ضریب تبدیل جهت تبدیل انرژی الکتریکی به معادل حرارتی آن می باشد [5,7].

4- فرمول بندی مسئله بهینه سازی و اعتبارسنجی

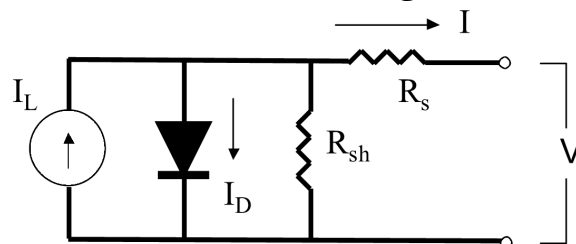
برنامه شبیه ساز کامپیوتری

فرمول بندی مسئله بهینه سازی با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای T_{amb} ، $T_{cell,ref}$ ، $T_{f,in}$ ، $NOCT$ ، G ، G_{ref} ، A_{mod}

مدل پنج پارامتری برای معرفی منحنی مشخصه جریان-ولتاژ $(I-V)$ سلول خورشیدی به صورت زیر است [15]:

$$I = I_L - I_o \left[\exp((V + IR_s)/a) - 1 \right] - (V + IR_s)/R_{sh}. \quad (27)$$

پنج پارامتر این مدل a ، I_o ، I_L ، R_s و R_{sh} به ترتیب ضریب مطلوبیت⁵، جریان اشباع معکوس⁶، جریان نوری⁷، مقاومت سری⁸ و مقاومت شنت⁹ معرفی می شوند. در معادله (27) حاصل ضرب جریان اشباع معکوس در عبارت داخل براکت، جریان دیود (I_D) را نشان می دهد. شکل (2) مدار الکتریکی معادل مدل پنج پارامتری را نشان می دهد.



شکل 2- مدار الکتریکی معادل مدل پنج پارامتری [15].

شرایط لازم برای یافتن پارامترهای مذکور عبارتند از:

$$I = I_{sc,ref}, V = 0. \quad \text{در جریان اتصال کوتاه:}$$

$$I = 0, V = V_{oc,ref}. \quad \text{در ولتاژ مدار باز:}$$

$$I = I_{mp,ref}, V = V_{mp,ref}. \quad \text{در نقطه توان ماکزیمم:}$$

$$[dP/dV]_{mp} = 0. \quad \text{در نقطه توان ماکزیمم:}$$

$$[dI/dV]_{sc} = -1/R_{sh,ref}. \quad \text{در جریان اتصال کوتاه:}$$

پس از اعمال شرایط بالا روی معادله (27)، پنج معادله غیرخطی زیر برای یافتن مقادیر پارامترهای مذکور در شرایط مرجع حاصل می شوند:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp((I_{sc,ref} R_{s,ref})/a_{ref}) - 1 \right] - I_{sc,ref} R_{s,ref} / R_{sh,ref}, \quad (28)$$

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp(V_{oc,ref} / a_{ref}) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}}, \quad (29)$$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}) / R_{sh,ref} - I_{o,ref} \left[\exp((V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_{s,ref}) / a_{ref}) - 1 \right], \quad (30)$$

$$[d(IV)/dV]_{mp} = 0, \quad (31)$$

$$[dI/dV]_{sc} = -1/R_{sh,ref}. \quad (32)$$

در معادلات قبل V_{oc} ، I_{sc} و V_{mp} ، I_{mp} به ترتیب ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم می باشند. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ $(I-V)$ سلول خورشیدی با تغییر دما و شدت تابش خورشیدی عوض می شود.

⁵ Ideality Factor

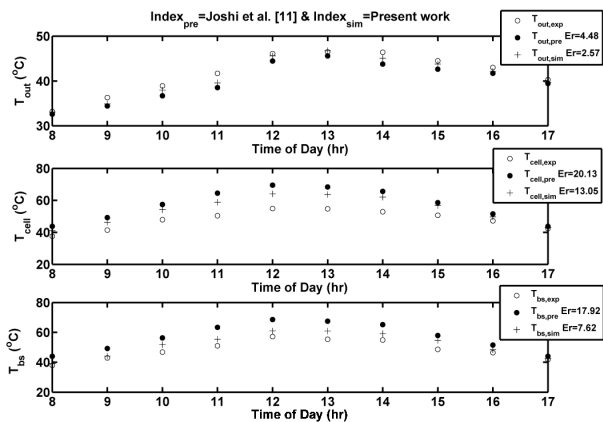
⁶ Reverse Saturation Current

⁷ Photocurrent

⁸ Series Resistance

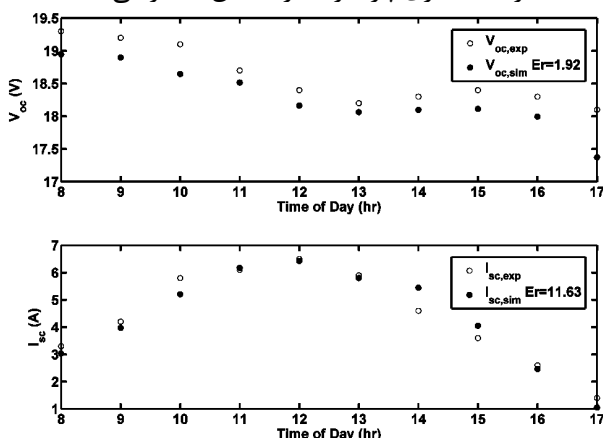
⁹ Shunt Resistance

¹⁰ Band Gap Energy



شکل 4- مقایسه بین مقادیر تجربی و شبیه سازی پارامترهای دمای سیال خروجی، دمای سطح مدول خورشیدی، دمای سطح زیرین تدار.

شکل های (4) و (5) به ترتیب مقایسه بین مقادیر تجربی و شبیه سازی پارامترهای دمای سیال خروجی، دمای سطح مدول خورشیدی، دمای سطح زیرین تدار، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و همچنین میزان جذر مربع متوسط درصد خطای¹¹ (RMS) هر پارامتر را نشان می دهند. اندیس pre مقادیر شبیه سازی پارامترها را توسط مرجع [7] معرفی می کند و اندیس sim مقادیر شبیه سازی پارامترها در تحقیق حاضر می باشد.



شکل 5- مقایسه بین مقادیر تجربی و شبیه سازی پارامترهای ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه.

مقادیر خطای RMS از رابطه زیر محاسبه می شوند [7,15]:

$$\left\{ \begin{aligned} Er &= \sqrt{\sum (Er_i)^2} / n, \\ Er_i &= [(X_{sim(pre),i} + X_{exp,i}) / X_{exp,i}] \times 100. \end{aligned} \right. \quad (45)$$

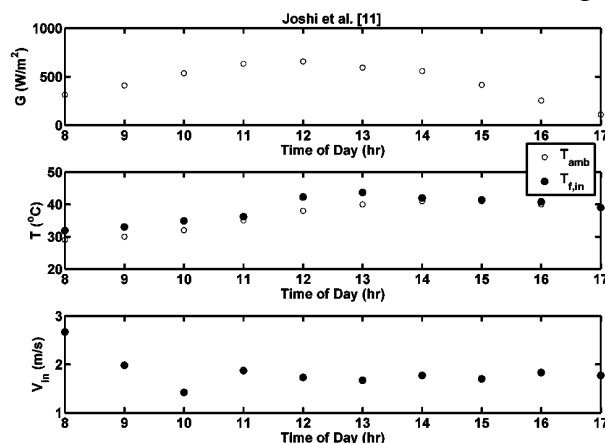
شکل (6) مقادیر شبیه سازی پارامترهای ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم را نشان می دهد. در مرجع [7] مقادیر این دو پارامتر در آزمایش اندازه گیری نشده است و همچنین مدل الکتریکی ارائه شده در این مرجع قادر به پیش بینی این دو پارامتر نمی باشد، ولی مدل ارائه شده در این مقاله این دو پارامتر را در شرایط جوی و طراحی آزمایش مرجع [7] پیش بینی کرده است.

$\alpha, \beta, \varepsilon, \eta_{el,ref}, V_{oc,ref}, V_{mp,ref}, I_{sc,ref}, I_{mp,ref}$ و غیره به صورت زیر می باشد:

$$\left\{ \begin{aligned} &\text{Maximize } \eta_{ov} = \text{Eq. (44)}, \\ &\text{subject to} \\ &\text{Eqs. (1) – (23), Eqs. (27) – (41) and Eq. (43)} \\ &\text{and} \\ &0.01 \leq V_{in} \leq 10 \text{ m/s}, \\ &A_{mod} \leq A_c \leq 16A_{mod} \text{ m}, \\ &I_{sc}, C_p, I_o, I_L, R_s, R_{sh}, a, b, I_{sc}, V_{oc}, \\ &I_{mp}, V_{mp}, S_{eff}, U_L, h_{p1}, h_{p2}, (\alpha T)_{eff} \geq 0, \\ &N_s, N_m, N_c \geq 1 \text{ and are integer.} \end{aligned} \right.$$

پارامترهای سرعت ورودی جریان سیال (V_{in}) و مساحت سطح PV/T (A_c) پارامترهای مستقل در بهینه سازی و سایر پارامترها از نوع پارامترهای وابسته در بهینه سازی می باشند. از آنجایی که معادلات تشکیل یافته غیرخطی می باشند، آن ها را به صورت عددی حل می کنند تا مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر که راندمان کلی را حداکثر می کنند، پیدا شوند. جهت این امر از توابع بهینه سازی نرم افزار MATLAB استفاده شده است.

جهت بررسی اعتبار برنامه شبیه ساز کامپیوتری مقایسه ای با نتایج آزمایشگاهی مرجع [7] صورت گرفته است. داده های آزمایشگاهی اندازه گیری شده شامل شدت تابش مؤثر خورشیدی، دمای محیط، دمای سیال ورودی و خروجی، دمای سطح مدول خورشیدی، دمای سطح زیرین تدار، سرعت سیال ورودی، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه می باشند. مقادیر داده های تجربی شدت تابش مؤثر خورشیدی، دمای محیط، دمای سیال ورودی، سرعت سیال ورودی در شکل (3) بر حسب زمان انجام آزمایش نشان داده شده اند.



شکل 3- داده های تجربی شدت تابش مؤثر خورشیدی، دمای محیط، دمای سیال ورودی و سرعت سیال ورودی بر حسب زمان روز [7].

¹¹ Root Mean Square of Percentage Error (RMS).

دو پارامتر مستقل بهینه‌سازی سرعت ورودی جریان سیال و مساحت سطح PV/T برای حداکثر شدن معادله راندمان کلی به صورت زیر یافت شده‌اند:

جدول 2- مقادیر بهینه پارامترهای بهینه‌سازی و تابع هدف.

$V_{in,opt} = 10 \text{ m/s}$	$\eta_{ov,max} = 67 \%$
$A_{c,opt} = 2.5296 \text{ m}^2$	

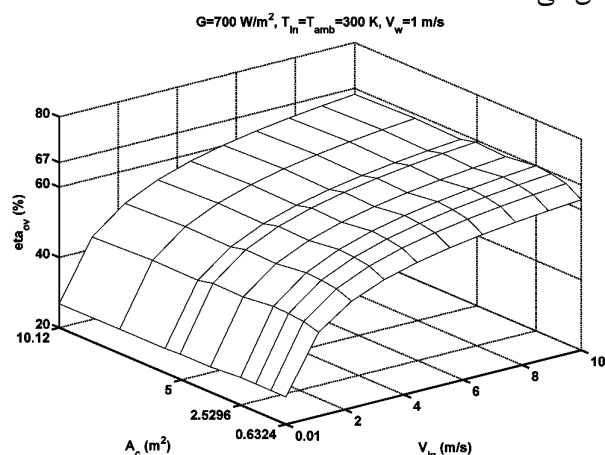
پس از حل معادلات قیود، پارامترهای وابسته در بهینه‌سازی به صورت زیر بدست می‌آیند:

جدول 3- مقادیر پارامترهای طراحی و عملکردی وابسته.

$N_s = 1$	$N_m = 4$
$N_c = 36$	$(\alpha\tau)_{eff} = 0.6659$
$h_{p1} = 0.7935$	$h_{p2} = 0.7954$
$a = 6.108 \text{ eV}$	$b = 2.031 \text{ m}$
$U_L = 7.6541 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	$C_p = 1.005 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
$I_{sc} = 3.3853 \text{ A}$	$V_{oc} = 74.4589 \text{ V}$
$I_{mp} = 3.0519 \text{ A}$	$V_{mp} = 57.1936 \text{ V}$
$I_o = 2.4202 \times 10^{-6} \text{ A}$	$I_L = 3.388 \text{ A}$
$R_s = 1.0715 \Omega$	$R_{sh} = 1.3545 \times 10^3 \Omega$
$\eta_{el} = 9.85 \%$	$\eta_{th} = 39.7 \%$
$\dot{Q}_u = 702.976 \text{ W}$	$S_{eff} = 1.7707 \times 10^3 \text{ W}$
$T_{f,out} = 300.5926 \text{ K}$	$T_{cell} = 315.7031 \text{ K}$
$T_{bs} = 308.8423 \text{ K}$	$\bar{T}_f = 300.2971 \text{ K}$

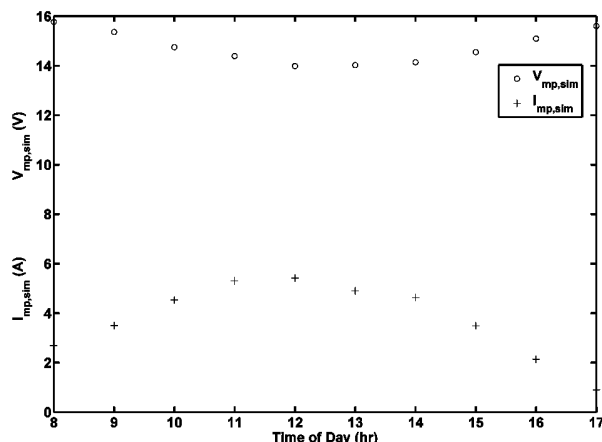
بحث روی نتایج

شکل (7) نمودار تغییرات راندمان کلی را به صورت سه بعدی بر حسب سرعت ورودی جریان سیال و مساحت سطح PV/T نشان می‌دهد.



شکل 7- نمودار تغییرات راندمان کلی بر حسب سرعت ورودی جریان سیال و مساحت سطح PV/T.

همان طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، راندمان کلی در یک ناحیه خاص حداکثر مقدار خود را دارد. مختصات این نقطه حداکثر، مقادیر بهینه پارامترهای مستقل بهینه‌سازی



شکل 6- مقادیر شبیه‌سازی پارامترهای ولتاژ و جریان در نقطه توان.

نتایج برنامه شبیه‌ساز کامپیوتری در توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [7] و دقیق‌تر از مقادیر شبیه‌سازی این مرجع می‌باشند. جدول (1) مقادیر پارامترهای محیطی و طراحی در نظر گرفته‌شده را برای مقایسه و بهینه‌سازی نشان می‌دهد.

جدول 1- شرایط محیطی و طراحی در نظر گرفته‌شده.

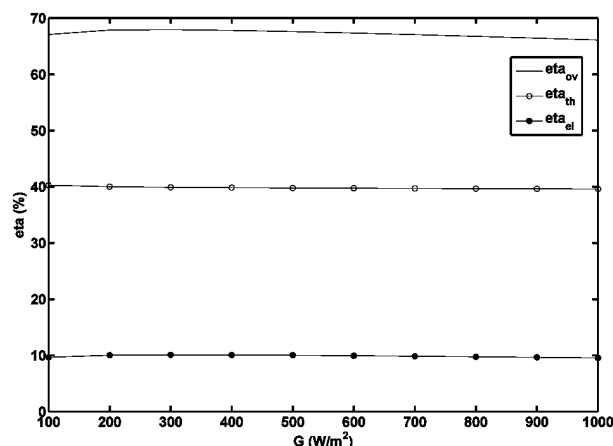
Value for validation [11]	Value for optimization
Module: Seimens SP75, monocrystalline silicon	Module: Seimens SP75, monocrystalline silicon
$G = \text{experimental data}$	$G = 700 \text{ W/m}^2$
$T_{cell} = \text{experimental data}$	$T_{cell} = \text{from optimization}$
$T_{f,in} = \text{experimental data}$	$T_{f,in} = T_{amb}$
$V_w = 1 \text{ m/s}$	$V_w = 1 \text{ m/s}$
$T_{amb} = \text{experimental data}$	$T_{amb} = 300 \text{ K}$
$\text{NOCT} = 318.15 \text{ K}$	$\text{NOCT} = 318.15 \text{ K}$
$I_{mp,ref} = 4.4 \text{ A}$ (for a module)	$I_{mp,ref} = 4.4 \text{ A}$ (for a module)
$V_{mp,ref} = 17 \text{ V}$ (for a module)	$V_{mp,ref} = 17 \text{ V}$ (for a module)
$\alpha = 2.06 \text{ mA/}^\circ\text{C}$	$\alpha = 2.06 \text{ mA/}^\circ\text{C}$
$\beta = -0.077 \text{ V/}^\circ\text{C}$	$\beta = -0.077 \text{ V/}^\circ\text{C}$
$\varepsilon = 1.12 \text{ eV}$	$\varepsilon = 1.12 \text{ eV}$
$N_s = 2$	$N_s = \text{from optimization}$
$N_m = 1$	$N_m = \text{from optimization}$
$A_{mod} = 0.6324 \text{ m}^2$	$A_{mod} = 0.6324 \text{ m}^2$
$\delta = 0.05 \text{ m}$	$\delta = 0.05 \text{ m}$
$L_T = 0.0005 \text{ m}$	$L_T = 0.0005 \text{ m}$
$K_T = 0.033 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$K_T = 0.033 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
$K_G = 1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$K_G = 1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
$L_{si} = 300 \times 10^{-6} \text{ m}$	$L_{si} = 300 \times 10^{-6} \text{ m}$
$\eta_{el,ref} = 0.12$	$\eta_{el,ref} = 0.12$

پارامترهای عملکردی و طراحی نظیر دمای ورودی سیال، مساحت سطح PV/T و غیره بهینه شد و مقادیر بهینه این پارامترها و پارامترهای وابسته دیگر نیز بدست آمدند. نمودار راندمان کلی به صورت سه بعدی بر حسب پارامترهای بهینه رسم و بررسی شد. همچنین تأثیر پارامترهای دیگری که در حین بهینه‌سازی ثابت فرض شده بودند بر راندمان‌های کلی، حرارتی و الکتریکی بررسی شد. علاوه بر افزایش دقت نتایج، حالت کارکرد بهینه PV/T نتیجه شده‌است و همچنین نتایج نشان می‌دهند که تأثیر پارامترهای طراحی مانند مساحت سطح PV/T بر راندمان کلی نسبت به پارامترهای عملکردی مانند سرعت سیال ورودی، دمای سیال ورودی و غیره کمتر است.

6- مراجع

- [1] Bhargava, A. K., Garg, H. P., and Agarwal, R. K., "Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cells", Energy Conversion and Management, Vol. 31, No. 5, pp. 471-479, 1991.
- [2] Hegazy, Adel A., "Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors", Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 861-881, 2000.
- [3] Ji, J., Chow, T. T., He, W., "Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong", Building and Environment, Vol. 38, pp. 1327-1334, 2003.
- [4] Zakharchenko, R., Licea-Jiménez, L., Pérez-García, S. A., Vorobiev, P., Dehesa Carrasco, U., Pérez-Robles, J. F., González-Hernández, J., Vorobiev, Yu., "Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 82, pp. 253-261, 2004.
- [5] Tiwari, A., Sodha, M. S., "Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 91, pp. 17-28, 2007.
- [6] Dubey, S., Tiwari, G. N., "Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater", Solar Energy, Vol. 82, pp. 602-612, 2008.
- [7] Joshi, A. S., Tiwari, A., Dincer, I., Reddy, B. V., "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 154-164, 2009.
- [8] Chow, T. T., Pei, G., Fong, K. F., Lin, Z., Chan, A. L. S., Ji, J., "Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover", Applied Energy, Vol. 86, pp. 310-316, 2009.
- [9] Ajam, H., Farahat, S., Sarhaddi, F., "Exergetic optimization of solar air heaters and comparison with energy analysis", International Journal of Thermodynamics, Vol. 8(4), pp. 183-190, 2005.
- [10] Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H. and Sobhnamayan, F., "Thermodynamic optimization of the solar parabolic cookers and comparison with energy analysis", The 5th International Chemical Engineering Congress (IChEC 2008), Kish Island, Iran, 2-5 Jan, 2008.
- [11] Farahat, S., Sarhaddi, F., Ajam, H., "Exergetic optimization of flat plate solar collectors", Renewable Energy, Vol. 34, pp. 1169-1174, 2009.
- [12] Watmuff, J. H., Charters W. W. S., Proctor D., "Solar and wind induced external coefficients for solar collectors", COMPLES 2, 56, 1977.
- [13] Sukhatme, S. P., "Solar Energy", McGraw-Hill, pp. 83-139, 1993.
- [14] Zondag, H.A., De Vries, D.W., Van Helden, W. G. J., Van Zolingen, R. J. C., Van Steenhoven, A. A., "The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector", Solar Energy, Vol. 72 (2), pp. 113-128, 2002.
- [15] De Soto, Widalys., "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", MS Thesis, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, pp. 20-74 [Chapter 2-3], 2004.
- [16] Luque, A., Hegedus, S., "Handbook of photovoltaic science and engineering", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2003.
- [17] Seimens solar module SM55, Available from: <http://www.elk.itu.edu.tr/~gunes/sm55.pdf>, 2009.

می‌باشد. با کاهش V_{in} راندمان کلی افت محسوسی می‌یابد که این مسئله محدوده خطر را بیشتر آشکار می‌سازد. از سوی دیگر مطابق هم‌مین شکل با افزایش A_c در سرعت بهینه ($V_{in,opt} = 10 \text{ m/s}$) راندمان کلی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد ولی تغییرات راندمان کلی نسبت به A_c چندان محسوس به نظر نمی‌رسد و مقادیری نزدیک به مقدار حداکثر را دارا می‌باشد. این موضوع این امکان را می‌دهد که با در نظر گرفتن سایر شرایط نظیر محدودیت‌های طراحی و هزینه‌های اقتصادی و راندمان حرارتی، طراحی بهینه انجام شود.



شکل 8- نمودار تغییرات راندمان کلی، راندمان حرارتی و راندمان الکتریکی بر حسب شدت تابش خورشید.

مطابق شکل (8) با افزایش شدت تابش خورشید، راندمان‌های کلی و الکتریکی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابند، ولی راندمان حرارتی کاهش می‌یابد که البته این کاهش چندان شدید نیست. از طرفی دیگر برای داشتن حداقل راندمان‌های کلی، حرارتی و الکتریکی برای سیستم PV/T بایستی یک حداقل شدت تابش خورشید داشته وجود داشته‌باشد. حد بالای شدت تابش خورشید با توجه به ازدیاد آلاینده‌ها در جو به حدود 1000 وات بر متر مربع می‌رسد. به هر حال تعیین شدت تابش خورشید بهینه در دست ما نبوده و به موقعیت جغرافیایی و داده‌های تابشی آن موقعیت جغرافیایی مربوط می‌شود، ولی آن چه که واضح است طراحی سیستم PV/T باید برحسب متوسط روزانه یا ماهانه شدت تابش خورشید صورت گیرد.

5- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا یک مدل‌سازی ریاضی جامع از شرایط عملکرد حرارتی و الکتریکی PV/T انجام شد. سپس راندمان کلی PV/T بدست آمد و مقایسه‌ای با کار گذشتگان صورت گرفت. در انتها توسط توابع بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB، راندمان کلی PV/T در یکسری از شرایط محیطی معین نسبت به برخی از