



بررسی تجربی استفاده از آب و اتیلن گلیکول به عنوان خنک کننده در یک سیستم فتوولتاییک حرارتی

محمد حسین زاده¹، آرش کاظمیان²، محمد سردارآبادی³، محمد پسندیده فرد^{4*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 1111-91775، mpfard@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 شهریور 1396

پذیرش: 16 مهر 1396

ارائه در سایت: 11 آبان 1396

کلید واژگان:

سیستم فتوولتاییک حرارتی

مخلوط آب و اتیلن گلیکول

تحلیل انرژی و انرژی

چکیده

در این مطالعه به صورت تجربی اثر استفاده از سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص بر بازده انرژی و انرژی سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی بررسی می‌شود. همچنین عملکرد دو سیستم فتوولتاییک حرارتی و فتوولتاییک معمولی با یکدیگر مقایسه می‌شود. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه دمای سطح سلول‌های فتوولتاییک، توان الکتریکی و حرارتی خروجی، بازده انرژی الکتریکی و حرارتی، انرژی الکتریکی و حرارتی، انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی و بازده انرژی الکتریکی و حرارتی هستند. با توجه به نتایج به دست آمده سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول توان الکتریکی خروجی از سیستم را حدود 5.41% نسبت به سیستم فتوولتاییک معمولی افزایش می‌دهد. نتایج همچنین نشان می‌دهد استفاده از سیال کاری آب خالص بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی را نسبت به مخلوط آب و اتیلن گلیکول، و اتیلن گلیکول، و اتیلن گلیکول خالص افزایش می‌دهد. در حالی که بازده انرژی کلی سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول تقریباً یکسان هستند.

Experimental Investigation of Using Water and Ethylene Glycol as Coolants in a Photovoltaic Thermal System

Mohammad Hosseinzadeh, Arash Kazemian¹, Mohammad Sardarabadi¹, Mohammad Passandideh-Fard^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* P.O.B 1111-91775, Mashhad, Iran, mpfard@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 August 2017
Accepted 08 October 2017
Available Online 02 November 2017

Keywords:
Photovoltaic Thermal System
Water/Ethylene Glycol Mixture
Energy and Exergy Analysis

ABSTRACT

In this study, the effects of using pure water, water/ethylene glycol mixture with 50:50 wt% and pure ethylene glycol as the working fluids on the energy and exergy efficiencies of a photovoltaic thermal (PVT) system are experimentally investigated. Moreover, the performance of the PVT systems are compared with a conventional photovoltaic (PV) system. The experiments are performed on a selected day in August at the Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (Latitude: 36° and Longitude: 59°). The investigated parameters in this study are: the photovoltaic cells temperature; output electrical and thermal powers; electrical and thermal energy efficiencies; output electrical and thermal exergies; and electrical and thermal exergy efficiencies. Based on the results, the PVT system with water/ethylene glycol mixture increases the output electrical power by about 5.41% compared to that of the PV system. Furthermore, the results indicate that using pure water in the PVT system enhances electrical and thermal energy efficiencies compared to those of pure ethylene glycol and water/ethylene glycol mixture, whereas the overall exergy efficiency of PVT systems with pure water and water/ethylene glycol mixture working fluids are approximately same.

1- مقدمه

جمله آبرگمکن‌های خورشیدی [1]، آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی [2]، خشک‌کن‌های خورشیدی [3] و اجاق‌های خورشیدی [4] استفاده می‌شود. یکی دیگر از انواع سیستم‌های خورشیدی به منظور تبدیل مستقیم انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی، سیستم‌های فتوولتاییک¹ (PV) هستند. در

امروزه به دلیل نگرانی‌های موجود در زمینه بهای سوخت‌های فسیلی و محدودیت‌های منابع و از طرف دیگر مشکلات زیست‌محیطی که استفاده از این سوخت‌ها در پی دارد، استفاده از انرژی خورشیدی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در عصر حاضر از انرژی خورشیدی برای مقاصد گوناگون از

¹ photovoltaic

Please cite this article using:

M. Hosseinzadeh, A. Kazemian, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Experimental Investigation of Using Water and Ethylene Glycol as Coolants in a Photovoltaic Thermal System, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 11, pp. 12-20, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

آب، اکسید تیتانیوم (TiO_2) - آب و اکسید روی (ZnO) - آب با درصد جرمی 0.2% را بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد سیستم با نانوسیال اکسید تیتانیوم - آب بیشترین بازده انرژی و انرژی الکتریکی را دارد. در حالی که سیستم با نانوسیال اکسید روی - آب بیشترین بازده انرژی و انرژی الکتریکی را دارد. شهسوار و همکاران [19] به صورت عددی و تجربی اثر استفاده از پوشش شیشه‌ای بر عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از پوشش شیشه‌ای در سیستم فتوولتاییک حرارتی بازده انرژی الکتریکی را کاهش و بازده انرژی حرارتی سیستم را افزایش می‌دهد. سرحدی و همکاران [20] به صورت عددی بازده انرژی و انرژی الکتریکی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد بازده کلی انرژی و انرژی الکتریکی سیستم موردنظر به ترتیب 45% و 10.75% است. تیواری و همکاران [21] به صورت عددی عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازده حرارتی سیستم با افزایش دبی جرمی سیال افزایش می‌یابد، همچنین آن‌ها یک دبی جرمی بهینه بیان کردند که در آن بازده انرژی کلی سیستم بیشینه می‌شود. فوجیسوا و تانی [22] به صورت تجربی عملکرد سه سیستم کلکتور خورشیدی با سیال کاری آب، سیستم فتوولتاییک معمولی و سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را با یکدیگر مقایسه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که سیستم فتوولتاییک حرارتی بیشترین انرژی و انرژی دریافتی کلی را نسبت به سایر سیستم‌های مطالعه شده دارد. هی و همکاران [23] به صورت تجربی عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی ترموسیفون⁵ با سیال کاری آب را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورتی که دمای آب خنک‌کننده ورودی به کلکتور برابر میانگین دمای روزانه باشد، بازده انرژی حرارتی سیستم به میزان 8% نسبت به یک سیستم فتوولتاییک ترموسیفون معمولی افزایش یافته و به مقدار 40% می‌رسد. بهاتارای و همکاران [24] به صورت عددی و تجربی به مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب پرداختند. آن‌ها همچنین عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی را با یک کلکتور خورشیدی مقایسه کردند. آن‌ها مشاهده کردند بازده انرژی حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی به ترتیب 58.70% و 71.50% است. آن‌ها نتیجه گرفتند بازده انرژی الکتریکی سیستم فتوولتاییک حرارتی 13.69% است. چو و همکاران [25] به صورت عددی و تجربی اثر پارامترهای مختلف بر بازده انرژی و انرژی الکتریکی سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای بررسی شده در مطالعه آن‌ها بازده سلول فتوولتاییک، ضریب پوشش⁶، دبی جرمی سیال آب، تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط بود. آن‌ها مشاهده کردند که افزودن پوشش شیشه‌ای به سیستم فتوولتاییک حرارتی، بازده انرژی کلی سیستم را افزایش و بازده انرژی الکتریکی سیستم را کاهش می‌دهد. حمزی و همکاران [26] به صورت عددی و تجربی عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی ترموسیفون و پمپی و با سیال کاری آب را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد بیشترین بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی پمپی به ترتیب 15% و 5% است. آن‌ها نتیجه گرفتند که بازده انرژی الکتریکی و بازده انرژی الکتریکی سیستم پمپی به ترتیب 3% و 2.5% از سیستم ترموسیفون بیشتر است.

سیستم‌های فتوولتاییک حدود 90% انرژی خورشیدی دریافتی جذب می‌شود [5]. در حالی که بازده این سیستم‌ها با توجه به نوع سلول‌های خورشیدی و شرایط کارکرد سیستم، بین 4%-17% متغیر است [6]؛ بنابراین بخش قابل توجهی از انرژی دریافتی به گرما تبدیل می‌شود. یکی از مشکلات این سیستم‌ها کاهش بازده الکتریکی به دلیل افزایش درجه حرارت سلول و در نتیجه افت ولتاژ مدار باز¹ آن است [7]. براساس مطالعات صورت گرفته بازده سیستم‌های فتوولتاییک با سلول‌های تک کریستاله² سیلیکونی با افزایش یک درجه سانتی‌گراد 0.45% کاهش می‌یابد [8]. از طرفی اگر این سلول‌ها مدت زمان زیادی تحت نوسانات دمایی قرار گیرند، ساختار آن‌ها دچار اختلال می‌شود [9]؛ بنابراین خنک کردن واحدهای فتوولتاییک اهمیت اساسی دارد که به این منظور می‌توان از سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی (PVT) استفاده کرد.

سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی ترکیبی از سیستم‌های فتوولتاییک معمولی و کلکتورهای حرارتی به منظور تولید هم‌زمان انرژی الکتریکی و گرمایی هستند. استفاده هم‌زمان از واحدهای الکتریکی و حرارتی سبب کاهش فضای اشغال شده، کاهش دمای سلول‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر سیستم و نیز افزایش بازده کلی (الکتریکی و حرارتی) سیستم می‌شود. نخستین مطالعات بر سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی در اواسط دهه 1970 صورت پذیرفت [10]. تاکنون پژوهش‌های عددی، تجربی و تحلیلی زیادی به منظور بررسی اثر عوامل مختلف بر عملکرد این سیستم‌ها از جمله نوع سلول‌های خورشیدی [11]، نوع سیال کاری [12]، نوع کلکتور [13] و شرایط محیط کارکرد [14] صورت گرفته است.

سیال استفاده شده در فرایند خنک‌کاری با توجه به موقعیت، امکانات و نوع کاربرد متفاوت بوده و می‌توان آن را به سه دسته کلی مایعات (مانند آب، مبرد و نانوسیال)، هوا و یا ترکیبی از آن‌ها تقسیم‌بندی کرد. استفاده هر یک از سیالات بیان شده در سیستم فتوولتاییک حرارتی مزایا و معایبی در پی دارد. معایب سیستم‌های با سیال کاری هوا شامل کم بودن میزان انتقال حرارت از سلول به دلیل ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی پایین هوا [15]، بالا بودن میزان انتقال حجم³ به دلیل چگالی پایین هوا، اتلافات حرارتی بالای سیستم از طریق نشت هوا [16] و وجود نوسانات دما در سیستم به دلیل جرم حرارتی⁴ کم هوا [17] هستند. شایان ذکر است که عوامل یادشده سبب کاهش بازده سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا می‌شوند. میزان انتقال حرارت از سلول در سیستم‌های با سیال کاری آب به دلیل بالا بودن ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی سیال از سیستم‌های با سیال کاری هوا بیشتر است [16]، همچنین کمتر بودن نوسانات دما در سیستم به دلیل جرم حرارتی بالای سیال و حجم کم جریان از دیگر مزایای سیستم‌های با سیال کاری آب هستند [17].

عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی می‌تواند از دو دیدگاه انرژی و انرژی مورد مطالعه قرار گیرد. تاکنون پژوهش‌های زیادی به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری مختلف صورت گرفته است. دقیق و همکاران [12] در یک مقاله مروری، عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، ترکیب آب و هوا و مبرد را مطالعه کردند. سردارآبادی و همکاران [18] به صورت تجربی بازده انرژی و انرژی الکتریکی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با نانوسیالات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) -

¹ Open circuit voltage

² Monocrystalline

³ Volume transfer

⁴ Thermal mass

⁵ Thermosyphon

⁶ Packing factor

است، همچنین مقدار تابش کلی خورشید به کمک یک پیرانومتر⁴ اندازه گیری می شود که به صورت موازی با سطح سیستم فتوولتائیک نصب شده است. آزمایش ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه انجام شده است. داده های آزمایش در یک روز معین در مرداد ماه از ساعت 9:30 تا 15:30 در فاصله زمانی 30 دقیقه گردآوری شده است.

3- تحلیل ترمودینامیکی

عملکرد یک سیستم مکانیکی می تواند از دیدگاه های مختلفی از جمله

جدول 1 مشخصات سیستم فتوولتائیک حرارتی [18]

Table 1 Properties of the photovoltaic thermal system [18]

واحد فتوولتائیک (تحت شرایط آزمایش استاندارد)

نوع	تک کریستاله سیلیکونی
جریان اتصال کوتاه (A)	2.57
ولتاژ مدار باز (V)	21.6
ضریب انباشتگی ⁵	0.726
توان نامی (W)	40
بازده سلول فتوولتائیک (%)	16
بازده واحد فتوولتائیک (%)	15

کلکتور حرارتی

نوع	صفحه - لوله
جنس	مس
ضخامت صفحه جاذب (mm)	0.4
قطر داخلی لوله ها (mm)	10
قطر خارجی لوله ها (mm)	12
ضریب پوشش کلکتور	1

جدول 2 خواص ترمودینامیکی سیالات کاری [28,29]

Table 2 Thermodynamic properties of the working fluids [28,29]

سیال کاری	خواص
آب	دمای انجماد (°C)
مخلوط آب و اتیلن گلیکول	دمای جوش (°C)
اتیلن گلیکول	چگالی (kgm ⁻³)
	ضریب هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
	ظرفیت گرمای ویژه (kgm ⁻¹ s ⁻¹)

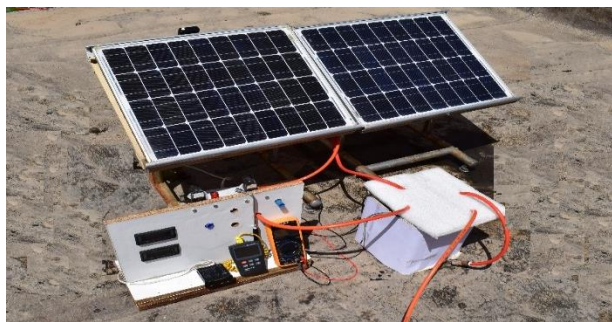


Fig. 1 A view of the experimental setup

شکل 1 نمایی از بستر آزمایشگاهی

افزودن درصدهای جرمی مختلف اتیلن گلیکول¹ به سیال کاری آب خالص سبب کاهش دمای انجماد سیال و حفاظت از سیستم در برابر خرابی های ناشی از انجماد سیستم در شرایط آب و هوایی سرد می شود [27]. اگرچه افزودن اتیلن گلیکول به سیال آب خالص با معایبی مانند کاهش ظرفیت گرمای ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال و همچنین خوردگی اجزای فلزی سیستم و آسیب به سیستم در اثر نشت سیال همراه است [27]. بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد تاکنون مطالعات زیادی به منظور بررسی اثر سیالات کاری مختلف بر عملکرد سیستم های فتوولتائیک حرارتی صورت گرفته است. اگرچه تاکنون پژوهشی که در آن اثرات استفاده از سیال کاری اتیلن گلیکول بر بازده انرژی و آگرزژی سیستم های فتوولتائیک حرارتی بیان شده باشد، ارائه نشده است. در این مطالعه عملکرد سیستم های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی کارایی سیستم های فتوولتائیک حرارتی بیان شده از دو دیدگاه انرژی و آگرزژی است، همچنین در پژوهش حاضر عملکرد سیستم های فتوولتائیک حرارتی موردنظر با یک سیستم فتوولتائیک معمولی مقایسه می شود. آزمایش ها در دانشگاه فردوسی مشهد و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است.

2- بستر آزمایشگاهی

در این مطالعه بستر آزمایشگاهی شامل دو واحد فتوولتائیک تک کریستاله سیلیکونی با 36 سلول خورشیدی است. یکی از این واحدها دارای کلکتور بازیافت حرارت مسی (سیستم فتوولتائیک حرارتی) و دیگری بدون کلکتور (سیستم فتوولتائیک معمولی) است. در سیستم فتوولتائیک حرارتی، واحد فتوولتائیک با استفاده از چسب سیلیکونی به بالای صفحه نازک مسی که در زیر آن لوله های مسی ماریچ قرار دارد، متصل شده است. مشخصات کامل سیستم فتوولتائیک حرارتی در جدول 1 بیان شده است. سیستم ها رو به جنوب و با زاویه 30 درجه نسبت به افق و تحت شرایط یکسان مورد آزمایش قرار می گیرند. نمایی از بستر آزمایشگاهی در شکل 1 نشان داده شده است. در این پژوهش سیال کاری در نظر گرفته آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص است که مشخصات ترمودینامیکی هر یک در جدول 2 بیان شده است. در سیستم فتوولتائیک حرارتی، سیال کاری در یک مخزن 5 لیتری ذخیره شده که به کمک یک پمپ با دبی جرمی ثابت 30 کیلوگرم بر ساعت در داخل سیستم جریان می یابد. به منظور ایجاد یک سیستم مدار بسته برای سیال کاری از یک مبدل حرارتی با کوئل ماریچ² که در داخل مخزن قرار دارد، استفاده شده است تا سیال را پس از گرم شدن در داخل سیستم خنک نماید. سیالی که در مبدل حرارتی برای خنک کاری استفاده می شود، آب شهر با دبی جرمی 40 کیلوگرم بر ساعت است. در این آزمایش دبی های جرمی توسط روتامتر کالیبره شده با استوانه مدرج اندازه گیری می شود. دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور و همچنین دمای سلول های فتوولتائیک، توسط ترموکوپل های از نوع کی³ اندازه گیری می شوند. دمای محیط توسط دماسنج جیوه ای نصب شده در نزدیک سیستم ها اندازه گیری می شود. جهت اندازه گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز از مولتی متر دیجیتال با قابلیت ذخیره سازی داده ها استفاده شده

¹ Ethylene glycol

² Helical coil heat exchanger

³ K

⁴ Pyranometer

⁵ Filled factor

نرخ انرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور، \dot{E}_{el}'' نرخ انرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح سلول‌های فتوولتاییک و \dot{E}_{sun}'' نرخ انرژی مؤثر تابش خورشید ورودی بر واحد سطح کلکتور هستند، همچنین r ضریب پوشش بوده و به صورت نسبت مساحت سلول‌های فتوولتاییک به مساحت کلکتور (A_{pv}/A_c) تعریف می‌شود. با توجه به روابط بیان شده بازده انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب توسط رابطه‌های (9,8) تعیین می‌شوند [15].

$$\eta_{el} = \frac{\dot{E}_{el}}{\dot{E}_{sun}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_{gl} \cdot \alpha_{cell}} \quad (8)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{\dot{E}_{sun}} = \frac{\dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,out} - T_{f,in})}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_{gl} \cdot \alpha_{cell}} \quad (9)$$

2-3- تحلیل انرژی

مشابه با تحلیل انرژی با در نظر گرفتن سیستم فتوولتاییک حرارتی به عنوان یک حجم کنترل واحد، معادله انرژی در رابطه (10) بیان شده است [18].

$$\dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{mass,in} = \dot{E}x_{el} + \dot{E}x_{mass,out} + \dot{E}x_{loss} \quad (10)$$

در رابطه (10) $\dot{E}x_{loss}$ نرخ انرژی اتلافی است. همچنین $\dot{E}x_{sun}$ نشان‌دهنده انرژی خورشید است که توسط رابطه (11) تعیین می‌شود [31].

$$\dot{E}x_{sun} = \dot{G} \cdot A_c \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}}\right) \quad (11)$$

در رابطه (11) T_{sun} دمای معادل خورشید به عنوان یک جسم سیاه بوده که تقریباً برابر 5800 درجه کلوین است، همچنین نرخ تغییر انرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (12) تعیین می‌شود [31].

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{mass,out} - \dot{E}x_{mass,in} &= \dot{E}x_{th} \\ &= \dot{m}_f [(h_{out} - h_{in}) - T_a (s_{out} - s_{in})] \\ &= \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \left[(T_{f,out} - T_{f,in}) - T_a \ln \left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}} \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

در رابطه (12) h_{in} و h_{out} به ترتیب آنتالپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور و همچنین s_{in} و s_{out} به ترتیب آنتروپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور هستند. از آنجا که تمام انرژی الکتریکی معادل کار در دسترس است، انرژی الکتریکی خروجی از واحد فتوولتاییک معادل انرژی الکتریکی خروجی بوده که در رابطه (13) نشان داده شده است [25].

$$\dot{E}x_{el} = \dot{E}_{el} \quad (13)$$

مشابه با تحلیل انرژی، بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌تواند به صورت تابعی از بازده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم نوشته شود که در رابطه (14) بیان شده است [25].

$$\varepsilon_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}x''_{th} + A_{pv} \dot{E}x''_{el}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (\dot{E}x''_{sun}) dt} = \varepsilon_{th} + r \cdot \varepsilon_{el} \quad (14)$$

در رابطه (14) ε_{el} ، ε_{th} و ε_{pvt} به ترتیب بازده انرژی الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی، $\dot{E}x''_{th}$ نرخ انرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور، $\dot{E}x''_{el}$ نرخ انرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح سلول‌های فتوولتاییک و $\dot{E}x''_{sun}$ انرژی خورشید بر واحد سطح کلکتور هستند. با توجه به روابط بیان شده بازده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب توسط روابط (15,16) تعیین می‌شوند [26].

ترمودینامیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی ترمودینامیکی (انرژی و انرژی) یک سیستم مکانیکی به دلیل ارائه کارایی سیستم در شرایط عملکردی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. تحلیل انرژی، کمیت و تحلیل انرژی، کیفیت انرژی را در یک سیستم فتوولتاییک حرارتی ارزیابی می‌کند.

1-3- تحلیل انرژی

با در نظر گرفتن سیستم فتوولتاییک حرارتی به عنوان یک حجم کنترل واحد و با فرض شرایط پایه، قانون اول ترمودینامیک در رابطه (1) بیان شده است [18].

$$\dot{E}_{sun} + \dot{E}_{mass,in} = \dot{E}_{el} + \dot{E}_{mass,out} + \dot{E}_{loss} \quad (1)$$

در رابطه (1) \dot{E}_{loss} نرخ انرژی اتلافی است، همچنین \dot{E}_{sun} نشان‌دهنده نرخ انرژی مؤثر تابش خورشید است که توسط رابطه (2) تعیین می‌شود [18].

$$\dot{E}_{sun} = \dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_{gl} \cdot \alpha_{cell} \quad (2)$$

در رابطه (2) A_c مساحت کلکتور، τ_{gl} قابلیت عبور تابش خورشید از پوشش شیشه‌ای، α_{cell} قابلیت جذب تابش خورشید توسط سلول‌های فتوولتاییک و \dot{G} نرخ تابش خورشید ورودی بر واحد سطح کلکتور است، همچنین نرخ تغییر انرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (3) قابل تعیین است [11].

$$\dot{E}_{mass,out} - \dot{E}_{mass,in} = \dot{E}_{th} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (3)$$

در رابطه (3)، \dot{m}_f دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور، $T_{f,out}$ و $T_{f,in}$ به ترتیب دمای متوسط سیال در ورودی و خروجی کلکتور هستند. نرخ انرژی الکتریکی خروجی از سیستم (\dot{E}_{el}) نیز توسط رابطه (4) تعیین می‌شود [18].

$$\dot{E}_{el} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (4)$$

در رابطه (4) V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF ضریب انباشتگی است. ضریب انباشتگی بیانگر حداکثر بازده سیستم فتوولتاییک بوده و توسط رابطه (5) محاسبه می‌شود [30]:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

در رابطه (5)، P_{max} بیشترین توان خروجی از سیستم فتوولتاییک است که توسط رابطه (6) تعیین می‌شود [30].

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (6)$$

در رابطه (6)، V_{max} بیشترین ولتاژ خروجی و I_{max} بیشترین جریان خروجی از واحد فتوولتاییک است که توسط کارخانه سازنده و در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی تعیین می‌شوند. بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی برابر نسبت مجموع انرژی‌های مفید الکتریکی و گرمایی خروجی به انرژی ورودی تابش خورشید در طول دوره زمانی t_1 تا t_2 است که در رابطه (7) بیان می‌شود؛ بنابراین بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌تواند به صورت تابعی از بازده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم نوشته شود [25].

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}''_{th} + A_{pv} \dot{E}''_{el}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (\dot{E}''_{sun}) dt} = \eta_{th} + r \cdot \eta_{el} \quad (7)$$

در رابطه (7) η_{el} ، η_{th} و η_{pvt} به ترتیب بازده انرژی الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی، A_{pv} مساحت سلول‌های فتوولتاییک، \dot{E}''_{th}

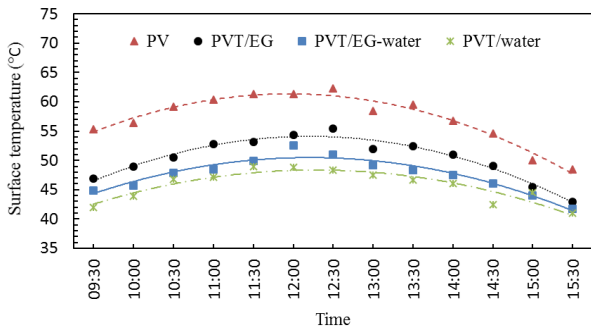


Fig 3 variations of the photovoltaic cells temperature during the daily experiments for the conventional PV and the PVT systems

شکل 3 تغییرات دمای سلول‌های فتوولتائیک در طول آزمایش برای سیستم‌های فتوولتائیک معمولی و فتوولتائیک حرارتی

سطح برای سیستم فتوولتائیک معمولی 57.22 درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین استفاده از سیال کاری آب خالص در سیستم فتوولتائیک حرارتی دمای سطح سیستم را به میزان 11.52 درجه سانتی‌گراد نسبت به یک سیستم فتوولتائیک معمولی کاهش می‌دهد. اختلاف دمای سطح سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول 1.78 درجه سانتی‌گراد است.

تغییرات روزانه توان الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول با درصد جرمی 50% با استفاده از رابطه (4) تعیین و در شکل 4 بیان شده است. با توجه به شکل 4 استفاده از سیستم فتوولتائیک حرارتی توان الکتریکی خروجی از سیستم را نسبت به سیستم فتوولتائیک معمولی افزایش می‌دهد. این امر ناشی از کاهش دمای سطح در سیستم فتوولتائیک حرارتی در مقایسه با سیستم فتوولتائیک معمولی است (مراجعه به شکل 3). همچنین شکل 4 نشان می‌دهد با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی توان الکتریکی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک به دلیل افزایش انرژی تابشی ورودی به سیستم افزایش می‌یابد؛ بنابراین در ظهر خورشیدی بیشترین توان الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول، و سیستم فتوولتائیک معمولی به ترتیب 114.20 و 110.23 وات بر مترمربع است. براساس شکل 4 میانگین روزانه دمای سطح سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول و سیستم فتوولتائیک معمولی به ترتیب 47.48، 50.38 و 57.22 درجه سانتی‌گراد است. درحالی‌که مقدار دمای

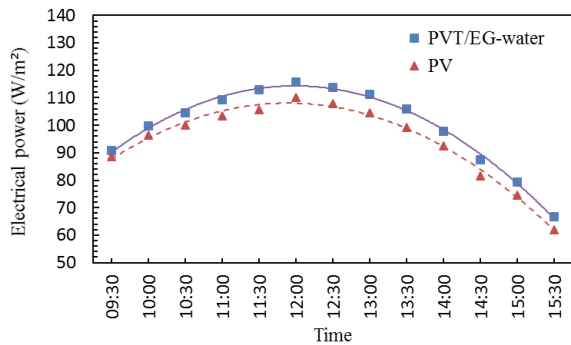


Fig 4 Variations of the output electrical power during the daily experiments for the conventional PV system and the PVT system with water/ethylene glycol mixture as the working fluid

شکل 4 تغییرات توان الکتریکی خروجی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتائیک معمولی و سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول

$$\varepsilon_{el} = \frac{\dot{E}x_{el}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{E}_{el}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}}\right)} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{th} = \frac{\dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{m}_f \cdot c_{p,f} \left[(T_{f,out} - T_{f,in}) - T_a \ln \left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}} \right) \right]}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{sun}}\right)} \quad (16)$$

4- نتایج

همان‌گونه که بیان شد در این مطالعه با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی عملکرد دو سیستم فتوولتائیک معمولی و فتوولتائیک حرارتی با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک با یکدیگر مقایسه شده است. اثر استفاده از سیال آب خالص، مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن‌گلیکول خالص بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی بررسی شده است. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه انجام شده است. داده‌های آزمایش در یک روز معین در مردادماه از ساعت 9:30 تا 15:30 در فاصله زمانی 30 دقیقه گردآوری شده است. شدت تابش دریافتی خورشید و دمای محیط در طول آزمایش اندازه‌گیری شده و در شکل 2 گزارش شده است. با توجه به داده‌های آزمایش مقدار متوسط دمای محیط و مقدار متوسط تابش دریافتی از خورشید در طول آزمایش به ترتیب 30.11 درجه سانتی‌گراد و 778.31 وات بر مترمربع هستند.

4-1- تحلیل انرژی

همان‌گونه که بیان گردید، هدف اصلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی بهبود عملکرد سیستم به وسیله خنک‌کاری سلول‌های فتوولتائیک است؛ بنابراین دمای سلول‌های فتوولتائیک یک پارامتر مهم در سیستم‌های فتوولتائیک است. در مطالعه حاضر تغییرات روزانه دمای سلول‌های فتوولتائیک در سیستم فتوولتائیک معمولی و سیستم‌های فتوولتائیک با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن‌گلیکول خالص در شکل 3 بیان شده است. همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی دمای سلول‌های فتوولتائیک را به میزان قابل توجهی نسبت به سیستم فتوولتائیک معمولی کاهش می‌دهد. میانگین روزانه دمای سطح سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی برای سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول، و اتیلن‌گلیکول خالص به ترتیب 45.70، 47.48 و 50.38 درجه سانتی‌گراد است. درحالی‌که مقدار دمای

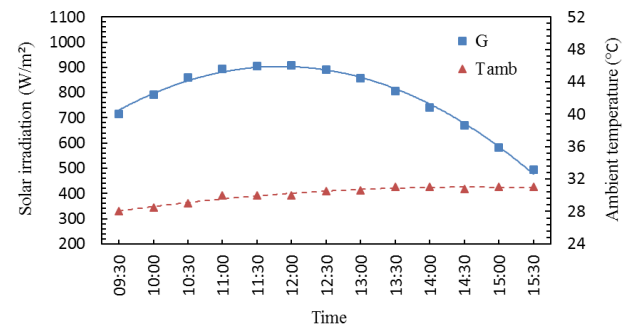


Fig. 2 Variations of solar radiation and ambient temperature during the test period

شکل 2 تغییرات تابش خورشید و دمای محیط در طول آزمایش

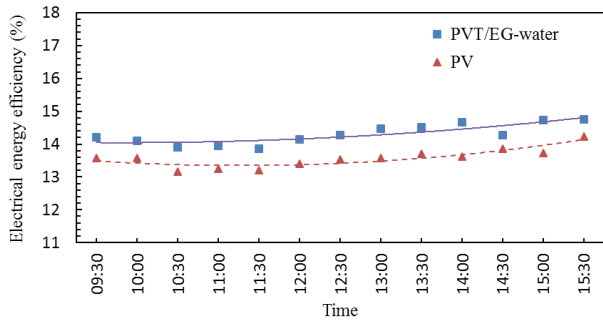


Fig 5 Variations of the electrical energy efficiency during the daily experiments for the conventional PV system and the PVT system with water/ethylene glycol mixture as the working fluid

شکل 5 تغییرات بازده انرژی الکتریکی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتائیک معمولی و سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول

مقایسه با سیستم با سیال کاری اتیلن گلیکول خالص به ترتیب حدود 18.13% و 9.84% است. با توجه به جدول 4 میانگین روزانه بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص به ترتیب 14.36% و 66.31% است؛ بنابراین میانگین بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی در پژوهش حاضر تقریباً در محدوده بیان شده در پژوهش گنگ و همکاران [32] است. محدوده گزارش شده در پژوهش آن‌ها برای بازده انرژی الکتریکی 4%-13% و برای بازده انرژی حرارتی 25%-75% است.

4-2- تحلیل انرژی

در این قسمت با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک، عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی و سیستم فتوولتائیک معمولی از دیدگاه انرژی بررسی می‌شوند. با استفاده از رابطه (11) میانگین روزانه انرژی خورشید 736.91 وات بر مترمربع است.

تغییرات روزانه انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% در شکل 6 بیان شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود انرژی حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی به مراتب کمتر از انرژی الکتریکی خروجی از سیستم است که نشان‌دهنده این است که کیفیت انرژی حرارتی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی کمتر از انرژی الکتریکی خروجی است. شکل 6 نشان می‌دهد انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی و افزایش انرژی خورشیدی زیاد می‌شود.

میانگین روزانه انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص در جدول 5 ارائه شده است. با توجه

جدول 4 میانگین روزانه بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی

Table 4 The daily average of the electrical, thermal and overall energy efficiencies of the PVT systems

بازده انرژی (%)	سیستم فتوولتائیک حرارتی		
	آب	مخلوط آب و اتیلن گلیکول	اتیلن گلیکول
الکتریکی	14.36	14.17	13.83
حرارتی	66.31	60.84	54.46
کلی	80.67	75.01	68.29

سیستم فتوولتائیک حرارتی توان الکتریکی خروجی از سیستم را حدود 5.41% نسبت به سیستم فتوولتائیک معمولی افزایش می‌دهد.

میانگین روزانه توان الکتریکی، حرارتی و کلی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص در جدول 3 بیان شده است. آب خالص ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص دارد (مراجعه به جدول 2)؛ بنابراین جذب حرارت از سلول‌های فتوولتائیک در سیال کاری آب خالص در مقایسه با دو سیال دیگر بیشتر بوده و سلول‌های فتوولتائیک خنک‌تر می‌شوند. در نتیجه همان‌گونه که در جدول 3 مشاهده می‌شود سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص بیشترین توان الکتریکی و حرارتی خروجی را در مقایسه با سایر سیستم‌ها دارد. با استفاده از رابطه (3) میانگین روزانه توان حرارتی خروجی از سیستم با سیال کاری آب خالص به ترتیب حدود 7.43% و 18.11% نسبت به مخلوط آب و اتیلن گلیکول و اتیلن گلیکول خالص بیشتر است. با توجه به جدول 3 استفاده از آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی میانگین توان الکتریکی خروجی از سیستم را به ترتیب حدود 3.69% و 2.36% نسبت به سیال کاری اتیلن گلیکول خالص افزایش می‌دهند.

شکل 5 تغییرات روزانه بازده انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خنک‌کاری سلول‌های فتوولتائیک در یک سیستم فتوولتائیک حرارتی بازده انرژی الکتریکی سیستم را نسبت به یک سیستم فتوولتائیک معمولی افزایش می‌دهد. با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی به دلیل افزایش دمای سلول‌های فتوولتائیک و همچنین کارایی کم سلول‌ها، نرخ افزایش توان الکتریکی خروجی از سیستم، کمتر از نرخ افزایش انرژی تابشی ورودی به سیستم است؛ بنابراین با توجه به رابطه (8) بازده انرژی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک کاهش می‌یابد. کمترین بازده انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول و سیستم فتوولتائیک معمولی به ترتیب 13.86% و 13.19% است.

میانگین روزانه بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص در جدول 4 ارائه شده است. با توجه به بیشتر بودن ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی آب خالص در مقایسه با سایر سیالات بررسی شده در مطالعه حاضر سیستم با سیال کاری آب خالص بیشترین بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی را دارد. جدول 4 نشان می‌دهد افزایش نسبی بازده انرژی کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول در

جدول 3 میانگین روزانه توان الکتریکی، حرارتی و کلی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی

Table 3 The daily average of the output electrical, thermal and overall powers of the PVT systems

توان خروجی (W/m ²)	سیستم فتوولتائیک حرارتی		
	آب	مخلوط آب و اتیلن گلیکول	اتیلن گلیکول
الکتریکی	100.70	99.41	97.12
حرارتی	451.88	420.63	382.60
کلی	552.58	520.04	479.72

یکسان نیست، بازده انرژی الکتریکی و بازده انرژی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک با یکدیگر متفاوت هستند. بازده انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و سیستم فتوولتائیک معمولی با استفاده از رابطه (15) تعیین و در شکل 7 نشان داده شده است. همان گونه در شکل 7 مشاهده می‌شود، مشابه با بازده انرژی الکتریکی، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی بازده انرژی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک کاهش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین بازده انرژی الکتریکی برای سیستم فتوولتائیک حرارتی و سیستم فتوولتائیک معمولی به ترتیب 13.18% و 12.50% است.

میانگین روزانه بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص در جدول 6 بیان شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با توجه به کیفیت پایین انرژی حرارتی در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی، بازده انرژی حرارتی این سیستم‌ها به مراتب کمتر از بازده انرژی الکتریکی است. سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و اتیلن گلیکول خالص به ترتیب بیشترین بازده انرژی الکتریکی و حرارتی را دارند، همچنین جدول 6 نشان می‌دهد که بازده انرژی کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول تقریباً یکسان است.

5- نتیجه گیری

در این مطالعه با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی و با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک (انرژی و انرژی) اثر استفاده از سیال کاری آب خالص، مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی بررسی شده است.

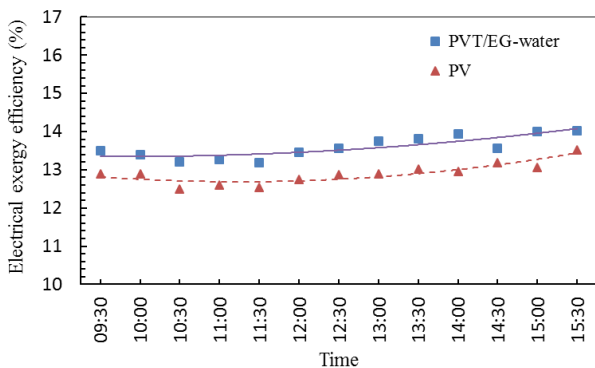


Fig 7 Variations of the electrical exergy efficiency during the daily experiments for the conventional PV system and the PVT system with water/ethylene glycol mixture as the working fluid

شکل 7 تغییرات بازده انرژی الکتریکی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتائیک معمولی و سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول

جدول 6 میانگین روزانه بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی

Table 6 The daily average of the electrical, thermal and overall exergy efficiencies of the PVT systems

بازده انرژی الکتریکی (%)	سیستم فتوولتائیک حرارتی	
	مخلوط آب و اتیلن گلیکول	اتیلن گلیکول
الکتریکی	13.46	13.14
حرارتی	0.75	1.01
کلی	14.21	14.15

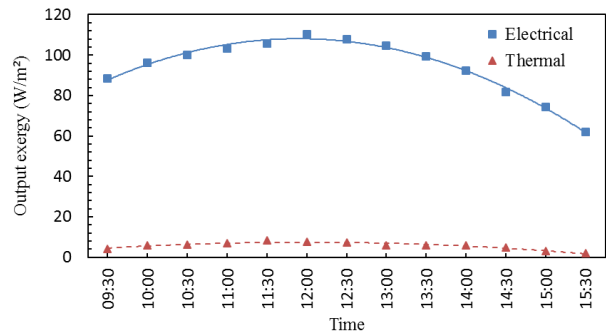


Fig 6 Variations of the output electrical and thermal exergies during the daily experiments for the PVT system with water/ethylene glycol mixture as the working fluid

شکل 6 تغییرات انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول

به رابطه (13) مخلوط کردن اتیلن گلیکول در آب سبب کاهش انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی می‌شود. در حالی که انرژی حرارتی خروجی از سیستم افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه (12) در دبی جرم ثابت، مقدار ضریب $(\dot{m}_f \cdot c_{p,f})$ برای آب خالص از مخلوط آب و اتیلن گلیکول، و اتیلن گلیکول خالص بیشتر است. این امر به دلیل بیشتر بودن ظرفیت گرمایی ویژه آب خالص نسبت به دو سیال دیگر است. مخلوط کردن اتیلن گلیکول در آب دمای سیال خروجی از کلکتور را افزایش می‌دهد؛ بنابراین با توجه به دماهای اندازه‌گیری شده برای سیالات کاری مورد نظر مقدار ضریب $[(T_{f,out} - T_{f,in}) - T_a \ln(T_{f,out}/T_{f,in})]$ برای اتیلن گلیکول خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول نسبت به آب خالص بیشتر است. در نتیجه با توجه به رابطه (12) استفاده از سیال کاری اتیلن گلیکول خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی انرژی حرارتی خروجی از سیستم را به ترتیب 66.67% و 23.09% نسبت به سیال کاری آب خالص افزایش می‌دهد. همان گونه که جدول 5 مشاهده می‌شود با توجه به اثرات مخالف مخلوط کردن اتیلن گلیکول در آب بر انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی، انرژی الکتریکی کلی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی اختلاف اندکی با یکدیگر دارند. اگرچه سیستم با سیال کاری آب خالص بیشترین انرژی الکتریکی کلی خروجی را نسبت به سایر سیستم‌ها دارد.

با توجه به رابطه (13) انرژی الکتریکی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک برابر انرژی الکتریکی خروجی از آن‌ها است؛ بنابراین با توجه به مطالب بیان شده میانگین انرژی الکتریکی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی نسبت به سیستم فتوولتائیک معمولی بیشتر است، ولی باید توجه داشت که چون انرژی ورودی به سیستم‌ها با انرژی ورودی

جدول 5 میانگین روزانه انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی خروجی از سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی

Table 5 The daily average of the output electrical, thermal and overall exergies of the PVT systems

انرژی الکتریکی خروجی (W/m²)	سیستم فتوولتائیک حرارتی	
	مخلوط آب و اتیلن گلیکول	آب
الکتریکی	99.41	100.70
حرارتی	5.65	4.59
کلی	105.06	105.29

قابلیت عبور تابش خورشید	τ
قابلیت جذب تابش خورشید	α
	زیر نویس ها
محیط	a
کلکتور	c
سلول خورشیدی	cell
الکتریکی	el
سیال	f
پوشش شیشه	gl
ورودی	in
اتلاف	loss
جرم	mass
بیشینه	max
مدار باز	oc
خروجی	out
سیستم فتوولتائیک	pV
سیستم فتوولتائیک حرارتی	pvt
شرایط استاندارد	r
اتصال کوتاه	sc
خورشید	sun
حرارتی	th

7- مراجع

- [1] H. S. Xue, Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage, *Renewable Energy*, Vol. 86, No. 2, pp. 257-261, 2016.
- [2] A. El-Sebaei, E. El-Bialy, Advanced designs of solar desalination systems: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, No. 9, pp. 1198-1212, 2015.
- [3] C. Lamnatou, E. Papanicolaou, V. Belessiotis, N. Kyriakis, Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector, *Applied Energy*, Vol. 94, No. 6, pp. 232-243, 2012.
- [4] S. Geddam, G. K. Dinesh, T. Sivasankar, Determination of thermal performance of a box type solar cooker, *Solar Energy*, Vol. 113, No. 3, pp. 324-331, 2015.
- [5] P. Dupeyrat, C. Menezo, S. Fortuin, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, *Energy and Buildings*, Vol. 68, No. 1, pp. 751-755, 2014.
- [6] M. Chandrasekar, S. Suresh, T. Senthilkumar, Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures, *Energy Conversion and Management*, Vol. 71, No. 7, pp. 43-50, 2013.
- [7] M. Browne, B. Norton, S. McCormack, Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, No. 7, pp. 762-782, 2015.
- [8] S. A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 18, pp. 3368-3382, 2006.
- [9] T. T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 365-379, 2010.
- [10] H. Pierrick, M. Christophe, G. Leon, D. Patrick, Dynamic numerical model of a high efficiency PV-T collector integrated into a domestic hot water system, *Solar Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 68-81, 2015.
- [11] R. Daghighi, A. Ibrahim, G. L. Jin, M. H. Ruslan, K. Sopian, Predicting the performance of amorphous and crystalline silicon based photovoltaic solar thermal collectors, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 3, pp. 1741-1747, 2011.
- [12] R. Daghighi, M. H. Ruslan, K. Sopian, Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 8, pp. 4156-4170, 2011.
- [13] A. Ibrahim, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, M. Alghoul, M. Yahya, A. Zaharim, K. Sopian, Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 321-330, 2009.
- [14] U. Eicker, A. Colmenar-Santos, L. Teran, M. Cotrado, D. Borge-Diez, Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions: an analysis in three

عملکرد دو سیستم فتوولتائیک حرارتی و فتوولتائیک معمولی با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مردادماه انجام شده است. براساس بررسی‌های صورت گرفته مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان می‌شود:

- سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50%، توان الکتریکی خروجی از سیستم را حدود 5.41% نسبت به سیستم فتوولتائیک معمولی افزایش می‌دهد.

- استفاده از سیال کاری آب خالص در سیستم فتوولتائیک حرارتی، بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم را نسبت به سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% و اتیلن گلیکول خالص افزایش می‌دهد.

- انرژی حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی به مراتب کمتر از انرژی الکتریکی خروجی از سیستم است.

- مخلوط کردن اتیلن گلیکول در آب سبب کاهش انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی می‌شود. درحالی‌که انرژی حرارتی خروجی از سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری اتیلن گلیکول خالص، و مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% نسبت به آب خالص بیشتر است.

- بازده انرژی کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% تقریباً یکسان است.

- اگرچه سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص بیشترین بازده انرژی کلی را دارد ولی اختلاف بین بازده انرژی کلی سیستم با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50%، کمتر از 5.7% است. همچنین بازده انرژی کلی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص و مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% تقریباً یکسان است؛ بنابراین می‌توان از سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری مخلوط آب و اتیلن گلیکول با درصد جرمی 50% برای کاربرد در شرایط آب و هوایی سرد استفاده کرد.

6- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
\dot{E}	نرخ انرژی (W)
\dot{E}_x	نرخ انرژی (W)
FF	ضریب انباشتگی
\dot{G}	نرخ انرژی تابشی (Wm^{-2})
h	آنتالپی (Jkg^{-1})
I	جریان (A)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
P	توان الکتریکی خروجی (kW)
S	آنتروپی ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
T	دما (K)
t	زمان (s)
V	ولتاژ (V)

علائم یونانی

η	بازده انرژی (%)
ε	بازده انرژی (%)

- thermal solar-collector designed for natural circulation of water, *Applied Energy*, Vol. 83, No. 3, pp. 199-210, 2006.
- [24] S. Bhattarai, J. H. Oh, S. H. Euh, G. K. Kafle, D. H. Kim, Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 103, No. 8, pp. 184-193, 2012.
- [25] T. T. Chow, G. Pei, K. Fong, Z. Lin, A. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 3, pp. 310-316, 2009.
- [26] M. Hazami, A. Riahi, F. Mehdaoui, O. Nouicer, A. Farhat, Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions, *Energy*, Vol. 107, No. 14, pp. 78-94, 2016.
- [27] E. Sani, L. Mercatelli, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, L. Colla, P. Sansoni, Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95, No. 11, pp. 2994-3000, 2011.
- [28] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M. H. Dhaou, A. Jemni, Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, No. 4, pp. 367-377, 2016.
- [29] R. R. Sahoo, P. Ghosh, J. Sarkar, Energy and exergy comparisons of water based optimum brines as coolants for rectangular fin automotive radiator, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, No. 2, pp. 690-696, 2017.
- [30] M. Granström, K. Petritsch, A. Arias, A. Lux, M. Andersson, R. Friend, Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diodes, *Nature*, Vol. 395, No. 6699, pp. 257-260, 1998.
- [31] S. Park, A. Pandey, V. Tyagi, S. Tyagi, Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, No. 2, pp. 105-123, 2014.
- [32] P. Gang, F. Huide, Z. Tao, J. Jie, A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 911-921, 2011.
- different cities in Europe, *Energy and Buildings*, Vol. 70, No. 3, pp. 207-223, 2014.
- [15] Z. Qiu, X. Zhao, P. Li, X. Zhang, S. Ali, J. Tan, Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (Microencapsulated Phase Change Material) slurry based PV/T module, *Energy*, Vol. 87, No. 9, pp. 686-698, 2015.
- [16] M. A. Hasan, K. Sumathy, Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 7, pp. 1845-1859, 2010.
- [17] X. Zhang, X. Zhao, S. Smith, J. Xu, X. Yu, Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 599-617, 2012.
- [18] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian, M. Passandideh-Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, *Energy*, Vol. 138, No. 20, pp. 682-695, 2017.
- [19] A. Shahsavari, M. Ameri, M. Mahmoudabadi, Simulation and test of PV/T air systems with natural air flow operation, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 43, No. 1, pp. 31-40, 2011. (in Persian فارسی)
- [20] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 11, pp. 2184-2199, 2010.
- [21] A. Tiwari, S. Dubey, G. Sandhu, M. Sodha, S. Anwar, Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 12, pp. 2592-2597, 2009.
- [22] T. Fujisawa, T. Tani, Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 47, No. 1, pp. 135-148, 1997.
- [23] W. He, T. T. Chow, J. Ji, J. Lu, G. Pei, L. S. Chan, Hybrid photovoltaic and