

تحلیل عددی استفاده از آب گرم کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک- گرمایی در ایران

مسعود محمدی ساردوئی^۱ - حمید مرتضی پور^{۲*} - کاظم جعفری نعیمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۳

چکیده

در این تحقیق مطالعه عددی یک سامانه ترکیبی فتوولتائیک-گرمایی آبی با توان نامی ۸۸۰ وات برای ایران استفاده شده است. این سامانه از اجزایی شامل جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی آبی، گرم‌کن کمکی، پمپ، مخزن، مبدل حرارتی و لوله‌های اتصال تشکیل شده بود. عملکرد این سامانه در چهار فصل سال برای شهرهای مختلف (بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) توسط نرم‌افزار TRNSYS بررسی عددی شد. نتایج نشان داد که برق تولیدی توسط سامانه طراحی شده در شهرهای مختلف تقریباً ثابت است. به طوری که، بیش‌ترین مقدار اختلاف بین میانگین سالانه انرژی الکتریکی تولیدی در شهرهای مختلف، ۰/۵۲ کیلووات ساعت بر روز به‌دست آمد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار میانگین انرژی الکتریکی به‌ترتیب در تابستان برابر ۴/۶۵ و زمستان برابر ۲/۶۷ کیلووات ساعت بر روز مشاهده شد. بیش‌ترین میانگین انرژی حرارتی ۱۶ کیلووات ساعت بر روز و سهم انرژی حرارتی خورشیدی ۵۰ درصد در شهر بندرعباس مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی، سهم خورشیدی، فتوولتائیک-گرمایی

مقدمه

امروزه انرژی خورشیدی یک منبع انرژی جایگزین مهم برای سوخت‌های فسیلی است و نسبت به دیگر منابع انرژی ترجیح داده می‌شود، چرا که رایگان، فراوان، تمام نشدنی و غیرآلاینده می‌باشد (Basunia and Abe, 2001). یکی از راه‌های به‌کارگیری انرژی خورشیدی استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک است. در این سامانه‌ها، انرژی خورشیدی به‌صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود (Rothwarf and Böer, 1975). سلول‌های فتوولتائیک بیش از ۸۰ درصد تابش خورشید را جذب کرده و تنها ۵ تا ۲۰ درصد از آن را به انرژی الکتریکی و باقی‌مانده را به گرما تبدیل می‌کنند (Van Helden et al., 2004). برطبق ساختار سلول‌های خورشیدی گرما باعث کاهش توان آن‌ها می‌شود. دلیل این امر افزایش نرخ باز ترکیب حامل‌های شارژ به‌دلیل افزایش تراکم آن‌ها در دماهای بالا است (Dubey et al., 2013). با خنک کردن سلول‌های خورشیدی به‌وسیله جریان سیالی مانند آب یا هوا عملکرد تولید برق آنها بهبود می‌یابد. برای این منظور از سامانه فتوولتائیک-گرمایی استفاده می‌شود

(Chow, 2010). سامانه‌های ترکیبی یا فتوولتائیک-گرمایی سامانه‌هایی هستند که در آن‌ها به‌صورت هم‌زمان، انرژی حرارتی و الکتریسیته تولید می‌گردد (Kroiß et al., 2014). در سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی، اولویت اول تولید الکتریسیته است، که برای این منظور باید دمای سلول فتوولتائیک را در کم‌ترین سطح نگاه داشت تا بازده الکتریکی مناسبی داشته باشد (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007). در بیش‌تر سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی، امروزه از آب به‌عنوان سیال انتقال‌دهنده گرما استفاده می‌شود، زیرا بازده بیش‌تری نسبت به هوا دارد (Herrando et al., 2014). گردش سیال در درون شبکه خنک‌کننده به‌صورت گردش طبیعی و یا به‌صورت گردش اجباری انجام می‌گردد (Chow, 2010). طرح‌های مختلفی برای سامانه خنک‌کننده پنل فتوولتائیک در جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمایی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به انواع پوسته-لوله، صفحات موازی و جریان دوتایی اشاره کرد (Ziapour et al., 2014). برای افزایش بازده حرارتی سامانه فتوولتائیک-گرمایی، به‌طور معمول از یک پوشش شیشه‌ای که در قسمت بالای پنل فتوولتائیک قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. پوشش شیشه‌ای، با ایجاد یک مانع حرارتی موجب کاهش اتلاف حرارت از سطح رویی جمع‌کننده می‌گردد (Dupeyrat et al., 2014). تحقیقات نشان می‌دهند که سامانه فتوولتائیک-گرمایی مجهز به پوشش شیشه‌ای بازده حرارتی بیش‌تری نسبت به حالت بدون پوشش شیشه‌ای دارد (Joshi et al., 2009). با توجه به

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲ و ۳- استادیار بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: h.mortezapour@uk.ac.ir)

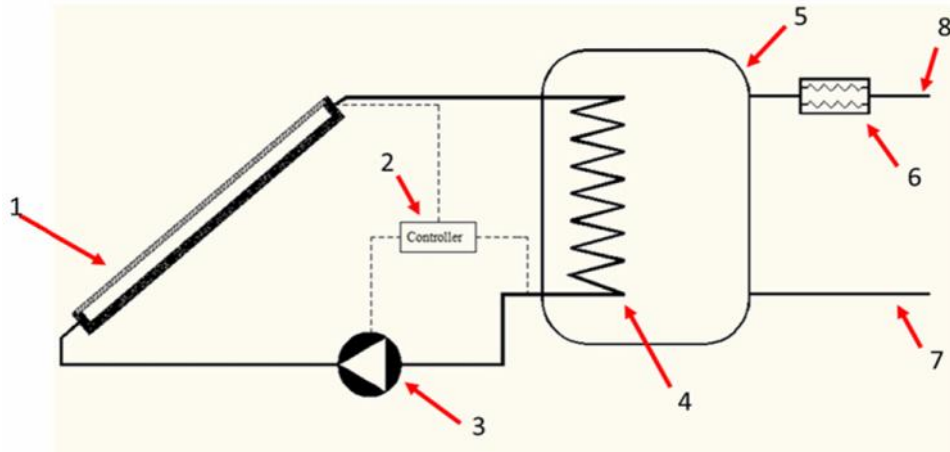
DOI: 10.22067/jam.v7i1.47426

مواد و روش‌ها

مشخصات سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی

شکل ۱ طرح‌واره‌ای از سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی مورد نظر در تحقیق را نشان می‌دهد. سامانه مورد نظر دارای دو مدار جریان سیال مستقل از یکدیگر است. مدار جریان بسته، که از اجزاء جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی، پمپ و مبدل حرارتی تشکیل گردید و مدار جریان باز، که از لوله‌های ورود و خروج آب مصرفی و مبدل حرارتی ساخته شد. در این سامانه، دو مدار در درون مخزن، به صورت غیرمستقیم با هم در ارتباط هستند و تبادل حرارت صورت می‌گیرد. جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی آبی مورد نظر، ترکیبی از پنل فتوولتائیک مرسوم و شبکه خنک‌کننده است. در این جمع‌کننده به طور هم‌زمان انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی تولید می‌شود. جمع‌کننده دارای ابعاد ۵/۶ متر مربع و با توان نامی الکتریکی ۸۸۰ وات در نظر گرفته شد. شبکه لوله‌های آب در مدار بسته، برای انتقال آب از شبکه خنک‌کننده پشت جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمایی به مبدل حرارتی و از مبدل حرارتی به پمپ انتقال سیال؛ و در مدار باز، از آب شهری به مخزن و از مخزن به لوله آب مصرفی کاربر متصل می‌باشد. مخزن دارای ظرفیت ۳۰۰ لیتر است و در آن یک مبدل حرارتی برای تبادل حرارت بین سیال گرم خروجی از جمع‌کننده و جریان آب مصرفی کاربر وجود دارد. در مدار بسته، سیال خنک‌کننده توسط پمپ از مبدل حرارتی، برای خنک کردن سلول‌های فتوولتائیک، به درون شبکه جمع‌کننده حرارتی فرستاده می‌شود. در جمع‌کننده خورشیدی، گرمای سلول‌های فتوولتائیک توسط سیال جذب و در ادامه با عبور از داخل شبکه مبدل حرارتی مخزن، به جریان آب مصرفی منتقل می‌گردد. جریان آب مصرفی، یک مدار جریان باز می‌باشد که توسط یک پمپ با دبی ثابت از شبکه لوله‌کشی آب شهری تغذیه می‌شود. برای رساندن دمای آب مصرفی به دمای مطلوب، یک گرم‌کن کمکی در مسیر خروجی آب از مخزن نصب گردید. با توجه به این‌که، در ساختمان‌های مسکونی قدیمی برای داشتن تهویه مطبوع، دمای آب ۷۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس مورد نیاز بوده، و در ساختمان‌های جدید به دلیل عایق‌بندی مناسب، دمایی بین ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس، کفایت (Van Helden *et al.*, 2004)، دمای کاری گرم‌کن بر روی ۶۰ درجه سلسیوس تنظیم شد. یک سامانه کنترل، برای کنترل و فعال‌سازی پمپ گردش آب در مدار بسته مورد استفاده قرار گرفت. این کنترل‌کننده، در هر لحظه دمای آب خروجی از جمع‌کننده و خروجی از مخزن در مدار بسته را مقایسه و چنانچه دمای آب خروجی از جمع‌کننده بیش‌تر از دمای آب داخل مخزن می‌شد، پمپ موجود در مدار جریان بسته را روشن می‌کرد.

هزینه‌های نسبتاً بالای ساخت و راه‌اندازی تجهیزات فتوولتائیک، تخمین عملکرد آن‌ها قبل از نصب، امری ضروری و حیاتی می‌باشد. از این رو، در پژوهش‌های متعددی، اقدام به شبیه‌سازی و تحلیل سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی در مناطق جغرافیایی مختلف گردیده است. در پژوهشی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی در سه شهر فرانسه توسط نرم‌افزار TRNSYS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیش‌ترین انرژی الکتریکی تولید شده در فصل‌های گرم سال می‌باشد (Dupeyrat *et al.*, 2014). در پژوهش دیگری عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی توسط نرم‌افزار TRNSYS در کشور کانادا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق مشخص کرد که در صورت استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی به‌جای فتوولتائیک مرسوم و آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، هزینه نگهداری سالانه ۲۱ درصد و انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱۶ درصد کاهش می‌یابد (Kegel *et al.*, 2014). در ایران پس از هدف‌مندی‌سازی یارانه‌ها، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، کاهش منابع و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف آن‌ها و ازطرفی، پاک، رایگان، در دسترس و فراوان بودن انرژی تابشی خورشیدی در اکثر مناطق جغرافیایی، باعث شده که استفاده از انرژی خورشید، مورد توجه فراوان قرار گیرد. در این راستا، می‌توان به نصب آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی، نیروگاه‌های فتوولتائیک کوچک در ابعاد خانگی و یا تأمین برق منازل روستایی با استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک اشاره کرد. با این وجود، با توجه به هزینه‌های پایین حامل‌های انرژی، استفاده از برق فتوولتائیک در ایران، هنوز توجیه اقتصادی چندانی ندارد (Mortezapour *et al.*, 2012). لذا، به‌کارگیری سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی به‌منظور تأمین هم‌زمان انرژی الکتریکی و گرمایی مورد نیاز، می‌تواند ضمن افزایش توان الکتریکی و تولید هم‌زمان انرژی حرارتی، راه‌حل مناسبی برای بهبود توجیه‌پذیری اقتصادی استفاده از برق خورشیدی باشد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که علاوه بر ساختار جمع‌کننده، موقعیت جغرافیایی، نیز بر عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی مؤثر می‌باشد (Herrando *et al.*, 2014). از طرفی، رفتار سامانه‌های ترکیبی فتوولتائیک-گرمایی با سامانه‌های فتوولتائیک یا گرمایی جداگانه متفاوت است و به‌سادگی نمی‌توان براساس عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک یا آب‌گرم‌کن خورشیدی مرسوم، برآورد دقیقی از مقدار تولید برق یا گرمای سامانه‌های فتوولتائیک-گرمایی ارائه کرد. لذا، هدف از انجام این تحقیق بررسی عددی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی در شهرهای مختلف ایران (شامل: بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) توسط نرم‌افزار TRNSYS است و پارامترهای انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی و سهم خورشیدی برای هر شهر مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد.



شکل ۱- طرح‌واره سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي: ۱- جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمايي آبي ۲- کنترل‌کننده ۳- پمپ ۴- مبدل حرارتي ۵- مخزن ۶- گرم‌کن کمکی ۷- ورودی آب شهری ۸- خروجی آب به سمت مصرف‌کننده

Fig. 1. Schematic view of the PVT system 1- PV/T collector 2- Controller 3- Pump 4- Heat exchanger 5- Tank 6- Auxiliary heater 7- Urban water inlet 8- Water outlet to consumer

۳۸/۰۶ درجه شمالی)، تهران (با طول ۵۱/۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۷ درجه شمالی) و کرمان (با طول ۵۷/۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰/۳ درجه شمالی) مورد بررسی قرار گرفت. زاویه قرارگیری جمع‌کننده ترکیبی نسبت به افق، در هر شهر برابر عرض جغرافیایی منطقه در نظر گرفته شد. به منظور انجام آزمایش‌ها، روزهای پنجم، پانزدهم و بیست و پنجم در تمام ماه‌های سال برای شبیه‌سازی انتخاب شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در هر آزمایش شامل، دمای آب خروجی از جمع‌کننده، دمای آب ورودی به آن، دمای آب مصرفی خروجی و ورودی به مخزن و خروجی از گرم‌کن کمکی، دمای میانگین سلول‌های خورشیدی و انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل بود. یکی دیگر از پارامترهای مورد ارزیابی، سهم خورشیدی بود. سهم خورشیدی بیان‌گر بخشی از انرژی حرارتی مصرفی که توسط خورشید تأمین گردیده است، می‌باشد. در ادامه سهم خورشیدی از رابطه‌ی (۱) محاسبه شد (Nualboonrueng et al., 2013).

$$SF = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \quad (1)$$

که در آن Q_{load} ، مقدار گرمای مورد نیاز برای رسیدن دمای آب شهری به مقدار مطلوب (kWh) و Q_{aux} انرژی حرارتی تأمین شده توسط منبع حرارتی کمکی (kWh) می‌باشند، صورت کسر آورده شده در رابطه (۱)، در واقع بیان‌گر انرژی حرارتی تأمین شده به وسیله‌ی جمع‌کننده‌ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمايي است.

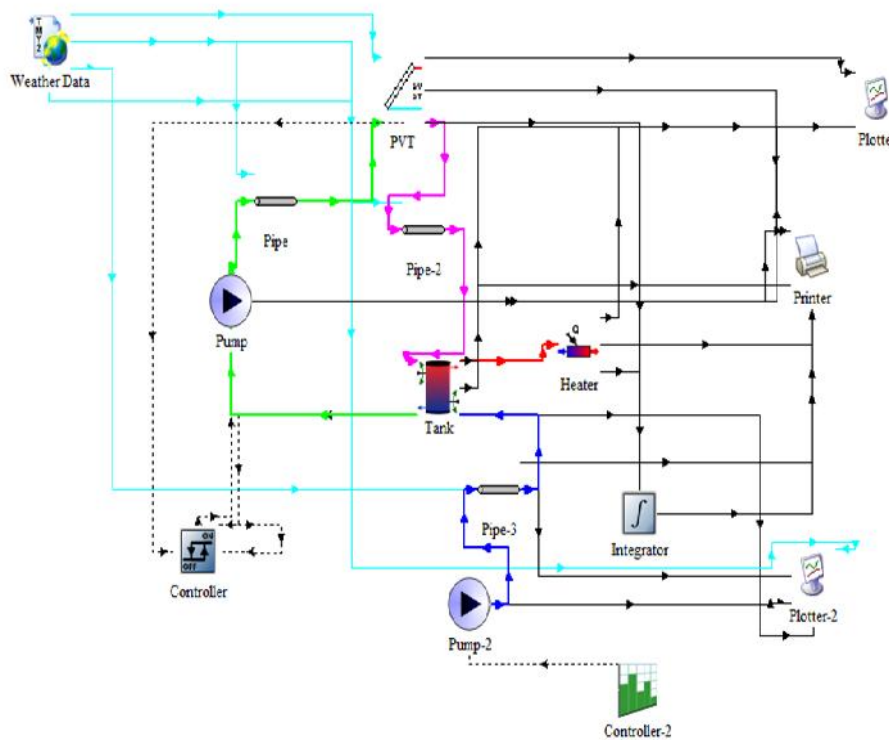
شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي

در نرم‌افزار شبیه‌سازی TRNSYS پارامترها و ورودی‌های متناسب با کارکرد سامانه به هریک از اجزاء آن داده می‌شود و نرم‌افزار با اعمال ریاضی بر روی پارامترها و ورودی‌ها، خروجی را به دو صورت گرافیکی و عددی نمایش می‌دهد. در این نرم‌افزار، هر جزء با مدل ریاضی حاکم بر عملکرد آن و به صورت یک المان مستقل، از قبل تعریف و در بانک المان‌های آن قرار داده شده است. طراحی یک سامانه در این نرم‌افزار، شامل چیدمان المان‌های مختلف به کار رفته در آن و اتصال صحیح خروجی و ورودی هر یک از آن‌ها می‌باشد. در شکل ۲ مدار طراحی شده سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي مورد نظر، در نرم‌افزار TRNSYS نشان داده شده است.

در جدول ۱ اجزای مورد استفاده در نرم‌افزار TRNSYS برای شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک-گرمايي آبي آورده و نوع هر کدام مشخص شده است.

روش انجام آزمایش

سامانه فتوولتائیک-گرمايي علاوه بر این که الکتریسیته تولید می‌کند، به صورت هم‌زمان گرمای سطح پنل فتوولتائیک را به کمک سامانه خنک‌کننده‌ای که در پشت آن قرار دارد جذب و باعث تولید توان حرارتی می‌شود. در تحقیق حاضر مجموعه فتوولتائیک-گرمايي آبي برای استفاده در مکان‌های آموزشی و اداری پیشنهاد شده است. عملکرد سامانه‌ی ترکیبی فتوولتائیک-گرمايي طراحی شده، در چهار شهر مختلف از نظر شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی شامل بندرعباس (با طول ۵۶/۲۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷/۱۷ درجه شمالی)، تبریز (با طول ۴۶/۲۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی



شکل ۱- مدار سامانه فتوولتائیک- گرمایی آبی طراحی شده در نرم‌افزار TRNSYS

Fig. 2. The simulated circuit of PV-thermal system in TRNSYS

جدول ۱- لیست اجزاء مورد استفاده برای شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک- گرمایی آبی

Table 1- List of the Component types used in the PV/T system simulation

Component اجزای سامانه	Type نوع المان	Input values مقدار ورودی
Controller 1 کنترلر ۱	Type 2b	-
Controller 2 کنترلر ۲	Type 14h-2	-
Collector جمع‌کننده خورشیدی	Type 50b	5.6 m ² and 880 W (Nualboonrueng <i>et al.</i> , 2013) مساحت ۵/۵ متر مربع و توان نامی ۸۸۰ وات
Auxiliary heating گرم‌کن کمکی	Type 6	Set point temperature (60 °C), maximum heating rate (2000 W). نقطه تنظیم ۶۰ درجه سلسیوس و توان بیشینه ۲۰۰۰ وات
Integrator	Type 24	-
Plotter نمایشگر	Type 65d	-
Printer چاپگر	Type 25a	-
Piping لوله	Type 31	Loss coefficient (29.83 W m ⁻² K ⁻¹), pipe length (3 m), inside diameter (2.56 cm) ضریب اتلاف حرارت ۲۹/۸۳ وات بر متر مربع کلین، طول لوله ۳ متر و قطر داخلی آن ۲/۵۶ سانتی‌متر
Pump دمنده	Type 3b	Flow rate (90 kg h ⁻¹) با دبی ثابت ۹۰ کیلوگرم بر ساعت
Weather data generator داده‌های هواشناسی	Type 109-TMY2	Inlet (Ambient temperature, Wind velocity, Total radiation on tilted surface) داده‌های دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش خورشید
Tank مخزن	Type 4d	Cold-Side temperature 15 °C دمای شاره سرد مخزن ۱۵ درجه سلسیوس

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل آماری

تمرکز اصلی این مقاله بر بررسی عددی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی در چهار شهر (بندرعباس، تبریز، تهران و کرمان) می باشد. نتایج تجزیه واریانس اثر شهر و فصل بر انرژی حرارتی و الکتریکی تولید شده در جمع کننده خورشیدی به کار رفته در سامانه فتوولتائیک-گرمایی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول، انرژی الکتریکی تولیدی سالانه در بین شهرها تفاوت چندانی نداشت. به طوری که، بیشترین مقدار اختلاف بین میانگین سالانه انرژی الکتریکی تولیدی در شهرهای مختلف، ۰/۵۲ کیلووات

ساعت بر روز به دست آمد. در حالی که، براساس یافته های (Besarati *et al.*, 2013) بیشترین اختلاف تولید برق تولیدی سالانه در بین چهار شهر مورد بررسی در تحقیق حاضر ۰/۳۳ کیلووات ساعت بر روز بود.

جدول ۲ همچنین نشان می دهد که انرژی حرارتی تولید شده در سامانه فتوولتائیک-گرمایی در شهرهای مختلف، متفاوت است و مقدار انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی در سامانه مورد نظر، در فصل های مختلف با احتمال ۹۹ درصد متفاوت می باشد. با توجه به جدول اثر متقابل شهر و فصل بر انرژی الکتریکی در سطح ۱٪ معنی دار و بر انرژی حرارتی معنی دار نیست.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای شهر و فصل بر انرژی الکتریکی و حرارتی

Table 2- Analysis of variance of the effect of city and season on the thermal and electrical energy generation

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean of square	
		Electrical energy انرژی حرارتی	Thermal energy انرژی الکتریکی
شهر City	3	1.053 ^{n.s}	364.524 **
فصل Season	3	46.048 **	1803.344 **
فصل × شهر City × Season	9	2.481 **	17.840 ^{n.s}
خطا Error	128	0.658	15.455
کل Total	144		

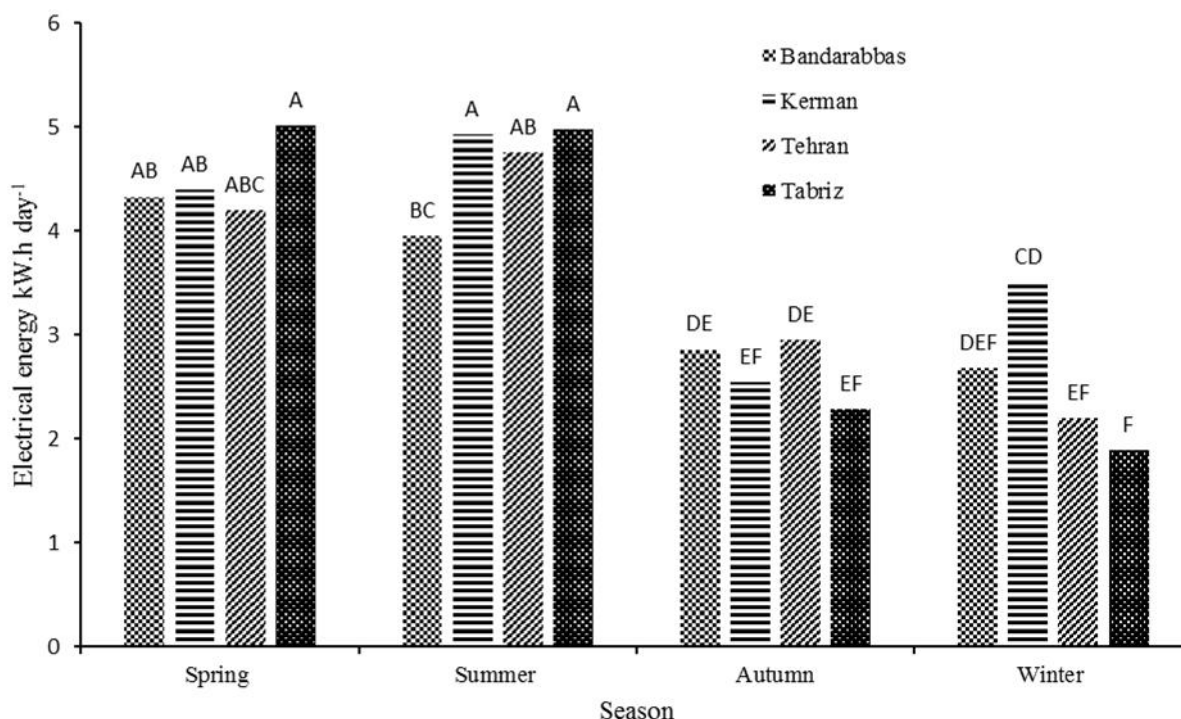
** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{n.s} غیر معنی دار

** Significant at 1% of probability levels, ^{ns} Non, Significant

گرمایی انرژی الکتریکی بیش تری نسبت به مناطقی که در عرض جغرافیایی پایین تری هستند، تولید کند. در نیمه دوم سال شدت تابش و ساعت های آفتابی کمتر است. در نتیجه انرژی الکتریکی کم تری در تمام شهرها تولید می گردد. همچنین در نیمه دوم سال مناطقی که در عرض جغرافیایی پایین تری هستند، شدت تابش و ساعت های آفتابی بیش تری نسبت به مناطقی که در عرض جغرافیایی بالاتری هستند، دارند. در فصل زمستان شهر کرمان با ۳/۵ کیلووات ساعت بیش ترین و شهر تبریز با ۱/۸۹ کیلووات ساعت کم ترین میانگین انرژی الکتریکی تولیدی روزانه را دارا می باشند. عامل مؤثر دیگر در تولید توان الکتریکی پنل های فتوولتائیک-گرمایی دمای سلول است. افزایش دمای کاری سلول فتوولتائیک باعث کاهش بازده الکتریکی می شود (Vokas *et al.*, 2014). این امر می تواند دلیل بیش تر شدن انرژی الکتریکی تولیدی در کرمان نسبت به بندرعباس باشد.

انرژی الکتریکی تولید شده به وسیله سامانه فتوولتائیک-گرمایی

میانگین انرژی الکتریکی برای هر فصل در شکل ۳ نشان داده شده است. بالاترین میانگین انرژی الکتریکی تولیدی روزانه در شهرهای مورد بررسی، در فصل تابستان و کم ترین آن در فصل زمستان به ترتیب روزانه ۴/۶۵ و ۲/۵۷ کیلووات ساعت می باشد. در فصل تابستان بیش ترین انرژی الکتریکی تولیدی در شهر تبریز با ۴/۹۸ کیلووات ساعت و کم ترین مقدار آن مربوط به شهر بندرعباس با ۳/۹۵ کیلووات ساعت می باشد. با توجه به این که، در تابستان، مقدار انرژی تابشی روزانه بر روی سطح شیب دار، در شهر تبریز، که در عرض جغرافیایی بالاتری قرار دارد، بیش تر است (Moini *et al.*, 2011; Haj Duffie and Beckman, 2006;) (Saghati, 2009)، این امر باعث می شود سامانه ی فتوولتائیک-



شکل ۳- مقایسه میانگین انرژی الکتریکی تولیدی هر شهر در فصل‌های مختلف

حروف مشترک روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

Fig. 3. Average electrical energy produced in each city and various seasons

Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly.

هر فصل متفاوت است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، میانگین سالانه انرژی حرارتی تولیدی در بین شهرها دارای اختلاف معنی‌داری است. بیش‌ترین انرژی حرارتی تولیدی در شهر بندرعباس با متوسط سالانه ۱۶ کیلووات ساعت در هر روز و کم‌ترین مقدار آن در شهر تبریز با ۸/۵۶ کیلووات ساعت در هر روز می‌باشد. با وجود این که در نیمه اول سال تبریز نسبت به بندرعباس شدت تابش و ساعت آفتابی بیش‌تری دارد، اما به دلیل شرایط اقلیمی بندرعباس، دمای محیط آن بیش‌تر است. از این رو بیش‌ترین میانگین سالانه انرژی حرارتی در شهر بندرعباس می‌باشد.

سهم خورشیدی

شکل ۷ نحوه تغییر سهم خورشیدی در ساعات مختلف روز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در فصل زمستان در شهرهای مانند تبریز و تهران در ساعت‌های اولیه طلوع خورشید سهم خورشیدی صفر است، به عبارت دیگر در این ساعت‌ها سامانه فتوولتائیک-گرمایی هیچ نقشی در تولید حرارت مورد نیاز ایفا نکرده است (به دلیل پایین

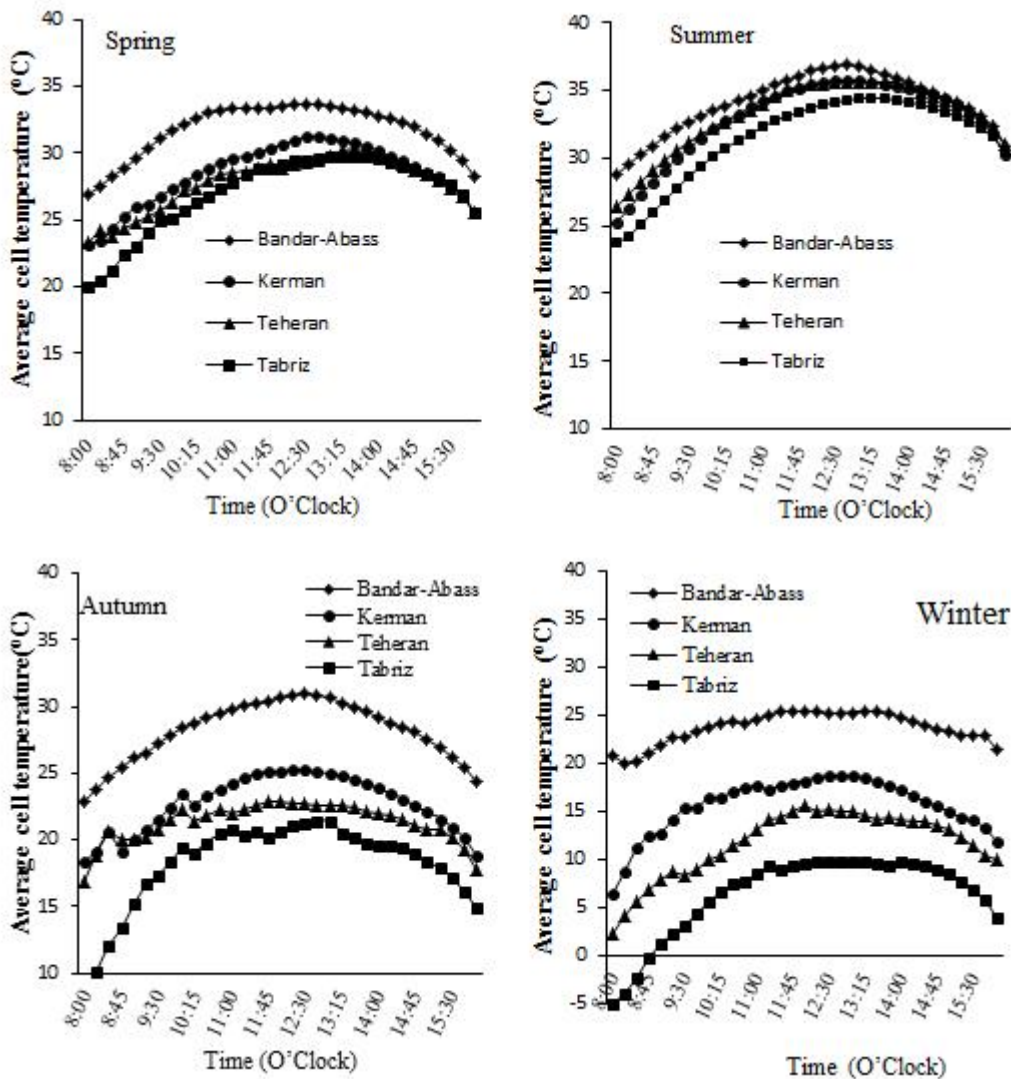
انرژی حرارتی تولید شده به وسیله سامانه فتوولتائیک-گرمایی

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در بین شهرها بیش‌ترین اختلاف دمای میانگین سلول فتوولتائیک در نیمه دوم سال است. با وجود این که در فصل زمستان بندرعباس نسبت به کرمان دارای شدت تابش و ساعت آفتابی بیش‌تری است، اما انرژی الکتریکی تولیدی در شهر کرمان بیش‌تر است (شکل ۴) که دلیل آن می‌تواند مربوط به بالاتر بودن دمای کاری سلول‌های فتوولتائیک در شهر بندرعباس باشد. بیش‌ترین دمای کاری سلول فتوولتائیک-گرمایی در شهر بندرعباس و در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۳۳، ۳۷، ۳۱ و ۲۵ درجه سلسیوس بود که بین ساعت‌های ۱۲ و ۱۳ اتفاق افتاد. اثر تغییر فصل بر انرژی حرارتی تولید شده در سامانه فتوولتائیک-گرمایی در شکل ۵ نمایش داده شده است. انرژی حرارتی تابعی از شدت تابش خورشید، ساعت آفتابی و دمای محیط است. از آنجا که هر فصل به دلیل زاویه و فاصله زمین نسبت به خورشید دارای شدت تابش و دمای محیطی متفاوتی می‌باشد، انرژی حرارتی تولیدی توسط سامانه فتوولتائیک-گرمایی در

(۱) سهم خورشیدی تابعی از انرژی حرارتی تولید شده توسط جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی است. بیشترین سهم خورشیدی در نیمه اول سال و در فصل تابستان می باشد. کمترین سهم خورشیدی در شهر تبریز و فصل زمستان است. به طوری که، بیشترین میانگین سهم خورشیدی در فصل تابستان با ۶۰ درصد و کمترین سهم خورشیدی در فصل زمستان با ۲۴ درصد می باشد. میانگین سالیانه سهم خورشیدی در شهرهای بندرعباس، کرمان، تهران و تبریز به ترتیب برابر ۵۰، ۴۱، ۳۴ و ۲۹ درصد می باشد.

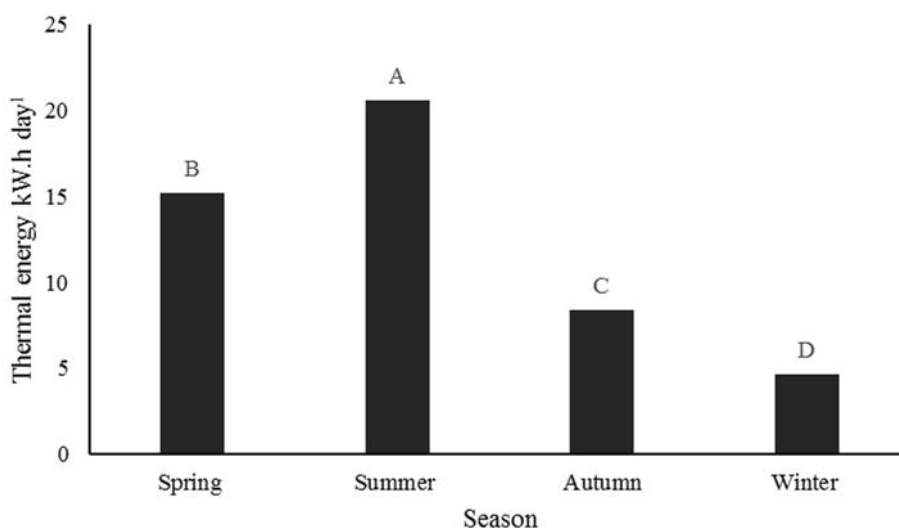
بودن دمای جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی جریان سیال مدار بسته توسط کنترلر قطع شده تا از هدررفت حرارتی جلوگیری شود) و این اتفاق در فصل پاییز برای شهر تبریز در ساعت های اولیه صبح قابل مشاهده است. همچنین، با توجه به شکل ۷، بیشترین مقدار سهم خورشیدی در طول روز برای شهرهای مختلف، با توجه به شدت تابش خورشید و دمای محیط، حدود ظهر و بین ساعت های ۱۲ و ۱۴ مشاهده می گردد.

میانگین مقدار سهم خورشیدی برای شهرهای مورد آزمایش در فصل های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به رابطه



شکل ۴- دمای میانگین جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی در هر فصل

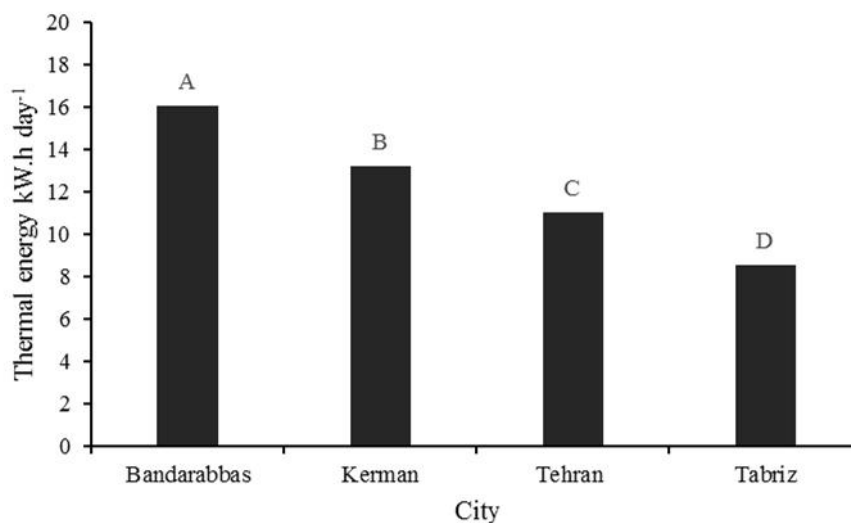
Fig. 4. Collector average temperature in each season



شکل ۵- میانگین تولید انرژی حرارتی شهرهای مختلف در هر فصل

حروف مشترک روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

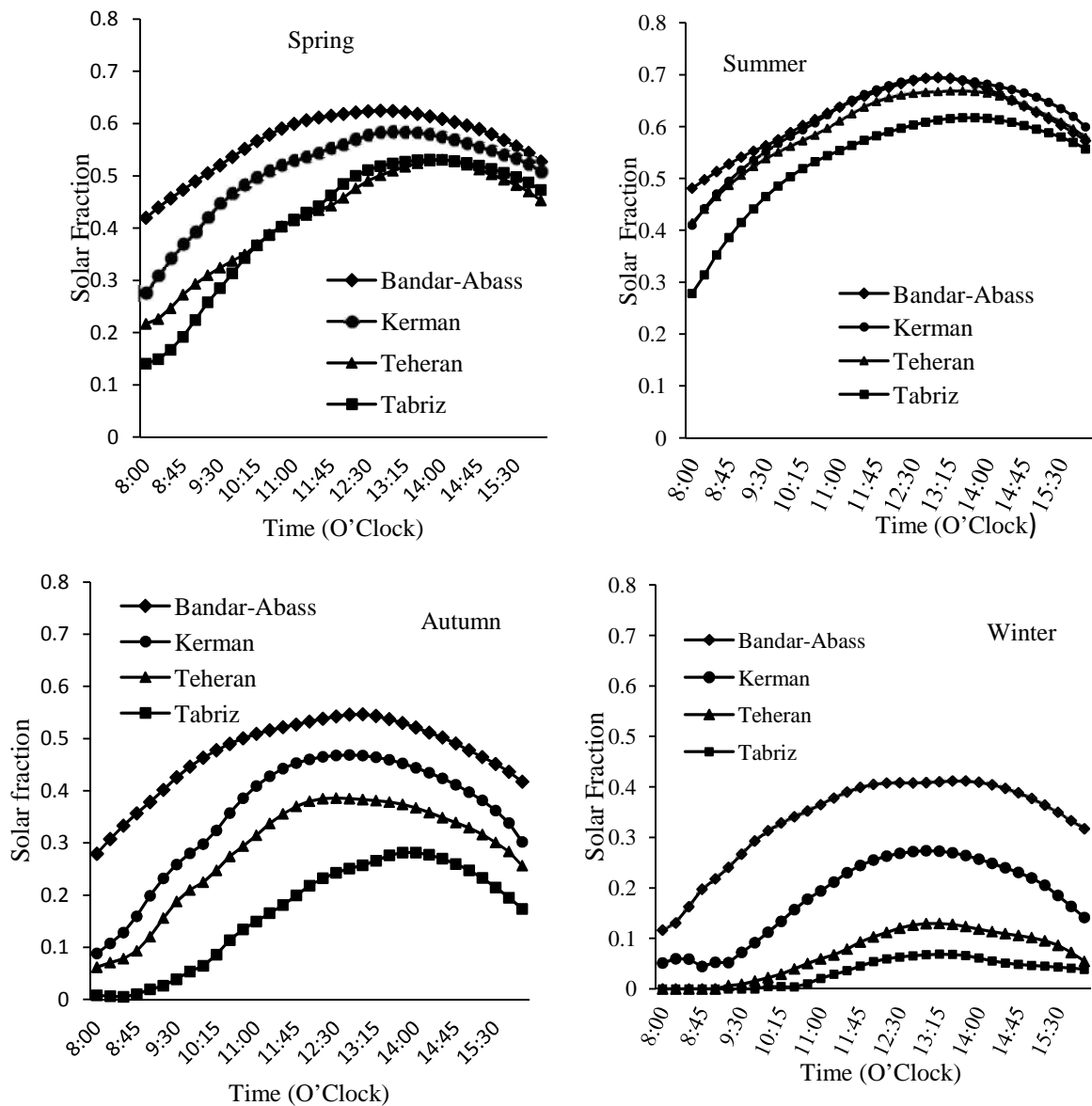
Fig. 5. The Average of thermal energy generation of studied cities in each season
Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly



شکل ۶- تغییرات انرژی حرارتی سالانه در شهرهای مختلف

حروف مشابه روی هر ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن می‌باشند.

Fig. 6. Variation of annual thermal energy in different cities
Columns with similar letters have no significant difference at the probability level of 1% according to Duncan's multiples range test significantly



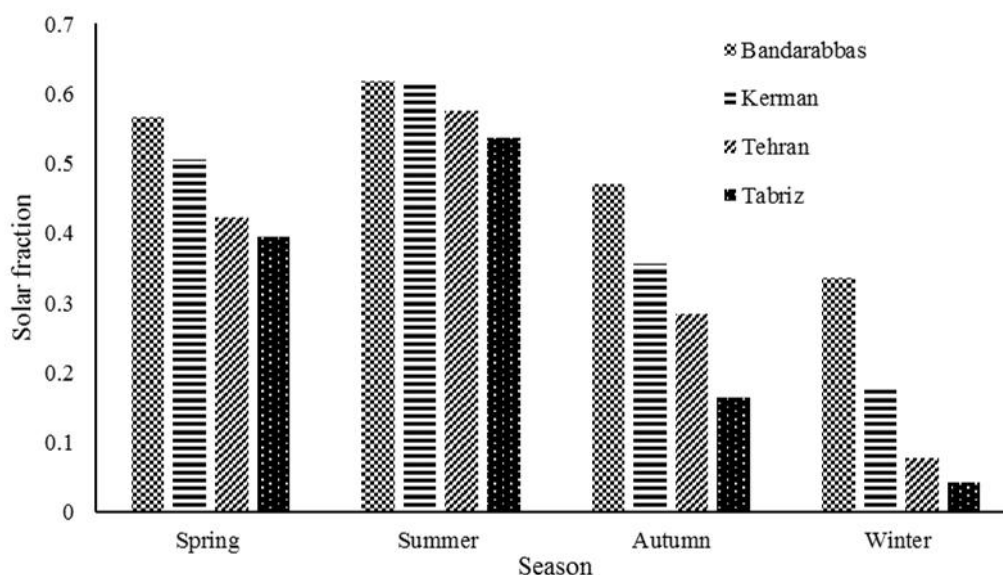
شکل ۷- میانگین سهم خورشیدی روزانه در چهار فصل
Fig. 7. The Average of solar fraction at the four seasons

- ۲- بیشترین میانگین سالانه انرژی حرارتی و سهم خورشیدی در شهر بندرعباس و به ترتیب ۱۶ کیلووات ساعت در هر روز و ۰/۵ می باشد.
- ۳- بیشترین دمای کاری سلول فتوولتائیک-گرمایی در شهر بندرعباس و در فصل های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۳۳، ۳۷، ۳۱ و ۲۵ درجه سلسیوس مشاهده گردید.
- ۴- در شهر تبریز با بالاترین عرض جغرافیایی، انرژی الکتریکی تولیدی سامانه مورد بررسی، در فصل های گرم سال از سایر شهرها بیش تر است.

نتیجه گیری

به طور خلاصه، نتایج حاصل از بررسی عملکرد سامانه فتوولتائیک-گرمایی آبی برای شهرهای بندرعباس، کرمان، تهران و تبریز در طول سال نشان داد که:

- ۱- جمع کننده فتوولتائیک-گرمایی در بندرعباس با کمترین عرض جغرافیایی در میان شهرهای مورد بررسی، دارای بالاترین تولید انرژی حرارتی و سهم خورشیدی در فصل های مختلف سال است. در حالی که، انرژی الکتریکی آن در تابستان از سایر شهرها کم تر می باشد.



شکل ۸- میانگین سهم خورشیدی در شهرها و فصل‌های مختلف

Fig. 8. Variation of solar fraction at different seasons and cities

References

1. Basunia, M., and T. Abe. 2001. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering* 47: 295-301.
2. Besarati, S. M., R. V. Padilla, D. Y. Goswami, and E. Stefanakos. 2013. The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants. *Renewable Energy* 53: 193-199.
3. Chow, T. T. 2010. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy* 87: 365-379.
4. Dubey, S., J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri. 2013. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia* 33: 311-321.
5. Duffie, J., and W. Beckman. 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Jone Wiley & Sons Inc. New York.
6. Dupeyrat, P., C. Menezo, and S. Fortuin. 2014. Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system. *Energy and Buildings* 68: 751-755.
7. Haj Saghati, A. 2009. *Solar Energy; Fundamental and Application*. Elmo o Sanat University. (In Farsi).
8. Herrando, M., C. N. Markides, and K. Hellgardt. 2014. A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Applied Energy* 122: 288-309.
9. Joshi, A. S., A. Tiwari, G. N. Tiwari, I. Dincer, and B. V. Reddy. 2009. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system. *International Journal of Thermal Sciences* 48: 154-164.
10. Kegel, M., J. Tamasauskas, and R. Sunye. 2014. Solar Thermal Trigeneration System in a Canadian Climate Multi-unit Residential Building. *Energy Procedia* 48: 876-887.
11. Kroiß, A., A. Präbst, S. Hamberger, M. Spinnler, Y. Tripanagnostopoulos, and T. Sattelmayer. 2014. Development of a seawater-proof hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector. *Energy Procedia* 52: 93-103.
12. Moini, S., and S. Javadi, and M. Dehghan-Manshadi. 2011. Feasibility study of solar energy in iran and preparing radiation atlas. *Recent Advances in Environment, Energy Systems and Naval Science* 2011: 1-7.
13. Mortezaipoor, H., B. Ghobadian, and A. Abbasbour. 2012. Financial Investigation of Using Solar-Powered LED For Park Lighting in Iran. *EWRES & ECRES The European Workshop & Conference on*

- Renewable Energy Systems. Antalya, TURKEY.
14. Nualboonrueng, T., P. Tuenpusa, Y. Ueda, and A. Akisawa. 2013. The performance of PV-t systems for residential application in Bangkok. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21: 1204-1213.
 15. Rothwarf, A. and K. Böer. 1975. Direct conversion of solar energy through photovoltaic cells. *Progress in Solid State Chemistry* 10: 71-102.
 16. Tonui, J., and Y. Tripanagnostopoulos. 2007. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32: 623-637.
 17. van Helden, W. G., and R. J. C. van Zolingen, and H. A. Zondag. 2004. PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12: 415-426.
 18. Vokas, G. A., and N. G. Theodoropoulos, and D. P. Georgiou. 2014. Simulation of Hybrid Photovoltaic/Thermal Air Systems on Building Facades. *Energy Procedia* 50: 917-930.
 19. Ziapour, B. M., V. Palideh, and M. Baygan. 2014. Performance comparison of four passive types of photovoltaic-thermal systems. *Energy Conversion and Management* 88: 732-738.

Numerical analysis of using hybrid photovoltaic-thermal solar water heater in Iran

M. Mohammadi Sarduei¹ - H. Morteza pour^{2*} - K. Jafari Naeimi²

Received: 09-06-2015

Accepted: 14-11-2015

Introduction

Electrical performance of solar cells decreases with increasing cell temperature, basically because of growth of the internal charge carrier recombination rates, caused by increased carrier concentrations. Hybrid Photovoltaic/thermal (PVT) systems produce electrical and thermal energy simultaneously. PVT solar collectors convert the heat generated in the solar cells to low temperature useful heat energy and so they provide a lower working temperature for solar cells which subsequently leads to a higher electrical efficiency.

Recently, in Iran, the reforming government policy in subsidy and increasing fossil fuels price led to growing an interest in use of renewable energies for residual and industrial applications. In spite of this, the PV power generator investment is not economically feasible, so far. Hybrid PVT devices are well known as an alternative method to improve energy performance and therefore economic feasibility of the conventional PV systems. The aim of this study is to investigate the performance of a PVT solar water heater in four different cities of Iran using TRNSYS program.

Materials and Methods

The designed PVT solar water system consists of two separate water flow circuits namely closed cycle and open circuit. The closed cycle circuit was comprised of a solar PVT collector (with nominal power of 880 W and area of 5.6 m²), a heat exchanger in the tank (with volume of 300 L), a pump and connecting pipes. The water stream in the collector absorbs the heat accumulated in the solar cells and delivers it to the water in the tank through the heat exchanger. An on/off controller system was used to activate the pump when the collector outlet temperature was higher than that of the tank in the closed cycle circuit. The water in the open circuit, comes from city water at low temperature, enters in the lower part of the storage tank where the heat transfer occurs between the two separate circuits. An auxiliary heater, connected to the tank outlet, rises the fluid temperature to the set point.

The performance of the designed system has been investigated in different cities (including Tabriz, Tehran, Kerman and Bandar-Abbas) during 4 seasons of year using Transient System Simulation (TRNSYS) program. The performance parameters included electrical and thermal energy generation and solar fraction. Solar fraction, which expresses the share of energy supplied by solar radiation on the collector in total thermal energy consumption, was obtained from equation 1.

$$SF = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \quad (1)$$

where Q_{load} and Q_{aux} are the total thermal energy consumption (kWh) and energy supplied by the auxiliary heater (kWh), respectively.

Results and Discussion

The results showed that the average daily electricity generation in the cities for summer and winter were 4.65 and 2.67 kWh day⁻¹, respectively. The annual electricity generation of the designed system is almost constant in the various cities. In winter, in spite of lower solar intensity and sunny hours, lower average temperature of solar cells in Kerman leads to a slightly better electrical performance than Bandar-Abbas. The highest cell

1- M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2 - Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

(* - Corresponding Author Email: h.morteza pour@uk.ac.ir)

temperatures, in Bandar-Abbas between 12 noon and 1pm, were found to be 33, 37, 31 and 25 °C in spring, summer, autumn and winter, respectively.

Thermal energy generation was significantly different at various cities and seasons. In winter, the designed system provides a little fraction (below 10 percent) of thermal demands in Tabriz and Tehran. This is mainly because of the low ambient temperature and solar intensity. The PVT system had a maximum average thermal energy of 16 kWh day⁻¹ and solar fraction of 0.5 which were observed in Bandar-Abbas. Tabriz, because of the lowest ambient temperature, had the least thermal energy generation and solar fraction. The maximum average solar fraction obtained in summer was about 60% while its lowest value in winter was 24%.

Conclusions

In the present study, a hybrid PVT solar water heater with nominal power of 880 W was proposed for application in Iran. The system was comprised of a PVT solar water collector, an auxiliary heater, a pump and connecting tubes. Technical feasibility of applying the proposed system in different cities was investigated using TRNSYS program. The results are summarized as follows:

The annual electricity generation of the designed system was almost constant in the various cities.

The highest and lowest values of average electricity generation in summer and winter were determined to be 4.65 and 2.67 kWh day⁻¹, respectively.

The PVT system had the maximum average thermal energy of 16 kWh day⁻¹ and solar fraction of 50%, which was observed in Bandar-Abbas.

Keywords: Electrical energy, Photovoltaic-thermal, Solar fraction, Thermal energy