



بررسی تجربی استفاده از لنز فرزنل در یک سیستم آبگرمکن خورشیدی با قابلیت تولید برق به وسیله مدول ترموالکتریک

میلاذ حسن نیا^۱، علی عباس نژاد^{۲*} و علی معظمی گودرزی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۵

چکیده

تولید همزمان برق و آب گرم از انرژی خورشید، موضوع پژوهش مورد مطالعه در این مقاله می‌باشد. در طرح ارائه شده از مدول‌های ترموالکتریک در مسیر انتقال گرما از سطح جاذب گرمای خورشید به انباره آب استفاده شده است. همچنین برای متمرکز نمودن نور خورشید و رسیدن به دمای قابل توجهی برای تولید برق به وسیله ترموالکتریک، از لنزهای فرزنل استفاده می‌شود. لنز فرزنل بکار برده شده از نوع متمرکز کننده نقطه‌ای بوده که ابعاد آن 30×30 سانتی‌متر مربع می‌باشد. برای استفاده بهینه از ظرفیت تولید برق مدول ترموالکتریک، پیشنهاد شده است که از آرایه‌ای از لنزهای فرزنل استفاده شود که به واسطه جریانی از روغن (به عنوان سیال حامل) گرما را به مدول ترموالکتریک منتقل می‌کند. بر اساس طرح ارائه شده، می‌توان با استفاده از ۶ عدد لنز فرزنل، توان الکتریکی در حدود W6 از یک مدول ترموالکتریک از نوع "TEP1-12656-0.6" بدست آورد. در این حالت توان تولید آب گرم در حدود W186 می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میزان ماکزیمم توان الکتریکی ترموالکتریک W08/1 تحت شدت تابش W/m298/705 است و در این حالت راندمان گرمایی سیستم در حدود ۵۱/۸۵ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: لنز فرزنل؛ مولد ترموالکتریک؛ آبگرمکن خورشیدی؛ تولید همزمان برق و حرارت.

Experimental Investigation of Fresnel Lens Application in a Solar Water Heater with the Electricity Generation via Thermoelectric Module

M. Hassasnadoon¹, A. Abbas Nejad^{2*}, A. Moazemi goudarzi³

¹ MSc. Student, Mech. Eng., Univ. of Shahrood, Shahrood, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., Univ. of Shahrood, Shahrood, Iran

³ Assist. Prof., Mech. Eng., Nooshiravani Univ. of Tech., Babol, Iran

Abstract

The aim of this paper is to investigate cogeneration of electricity and hot water. In the presented design, thermoelectric module has been devised in the path of heat transfer from solar heat absorber surface to a water reserve. Besides, Fresnel lens is employed to concentrate sunlight as well as to reach justified temperature by the means of thermoelectric modules. The Fresnel lens belongs to a class of point focus lenses, which its dimension is 30×30 cm². In order to optimal use of the thermoelectric capacity, it is proposed to devise an array of Fresnel lenses which can transfer heat to the thermoelectric module via mineral oil. The results show that approximately 186W thermal power and 6W electric power can be obtained by use of a thermoelectric module (type TEP1-12656-0.6) and 6 Fresnel lenses. Results indicate that the maximum thermoelectric power generation is 1.08W under radiation intensity of 705.98 W/m². Moreover, thermal efficiency of system is about 51.85%.

Keywords: Fresnel lens, thermoelectric generator, solar water heater, Cogeneration.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی، صورتی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد که می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی مناسب و پاک بکار گرفته شود. مطمئناً این نوع انرژی در آینده، ساختار اصلی انرژی‌های نو را به خود اختصاص داده و به‌طور فزاینده، باعث کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی خواهد شد. هرچند چگالی انرژی پایین و میزان دستیابی فصلی آن (بسته به موقعیت جغرافیایی) از مهمترین چالش‌های انرژی خورشیدی به عنوان منبع گرما می‌باشد. در نتیجه، رسیدن به تکنولوژی متمرکز کردن انرژی خورشیدی با بازدهی بالا، امری ضروری و غیر قابل اجتناب است [۱]. راهکار ارائه شده در این پژوهش برای تمرکز تابش خورشید بر سطح جاذب گرما و افزایش دما در حدود قابل استفاده، بهره‌گیری از لنزهای فرزنل می‌باشد.

در زمینه وسایل متمرکز کننده نور خورشید، لنزهای فرزنل به دلیل مزایایی از قبیل حجم کم، وزن سبک، قابلیت تولید انبوه با هزینه‌ی اندک و افزایش چگالی انرژی خورشیدی، یکی از بهترین انتخاب‌ها می‌باشند. نخستین پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی استفاده از لنز فرزنل جهت جمع‌آوری انرژی خورشیدی، وقتی میسر شد که پلی-متیل متاکریلیت^۱ به عنوان ماده‌ی اولیه‌ی سازنده لنز فرزنل در دسترس سازندگان و طراحان آن قرار گرفت. پلی-متیل-متاکریلیت، ماده‌ای با وزن سبک است که از پلیمر مقاوم ساخته شده و رفتار نوری آن تقریباً مشابه شیشه می‌باشد. همچنین از نظر شیمیایی در برابر نور خورشید، بسیار مقاوم بوده و از نظر حرارتی تا دمای ۸۰ درجه سلسیوس به‌صورت پایدار باقی می‌ماند [۲]. لذا بیشتر طراحان لنزهای فرزنل برای متمرکز کردن نور خورشید از این نوع ماده به‌دلیل بالا بودن کیفیت اپتیکی و کم هزینه بودن تکنولوژی ساخت آن، برای ساختن لنز استفاده می‌کنند. لنزهای فرزنل، استفاده‌ی وسیعی در تولید توان از نور خورشید [۳]، تولید هیدروژن [۴] و لیزرهای خورشیدی دارند [۵].

با بررسی طرح‌های اجرا شده در کشور با عنوان تولید هم‌زمان الکتریسیته و آب گرم از خورشید مشاهده می‌گردد، برای تولید برق از سیستم فتوولتائیک و برای تولید آب گرم

نیز از کلکتورهای متداول خورشیدی استفاده می‌شود. حال آن‌که موضوع این تحقیق، تولید برق به‌وسیله‌ی ترموالکتریک می‌باشد که با قراردادن مولدهای ترموالکتریک در مسیر تبادل گرما میان کلکتور خورشیدی و آب به‌طور هم‌زمان آب گرم و الکتریسیته تولید می‌گردد. در دو دهه‌ی اخیر، استفاده از ترموالکتریک بسیار وسیع و گسترده شده است. ترموالکتریک‌ها وسایلی هستند که به صورت مطمئن، باعث تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی شده، هیچ‌گونه سروصدا و ارتعاشی نداشته و فاقد قطعات متحرک مکانیکی می‌باشند. همچنین اندازه‌ی کوچک و وزن سبکی دارند. ترموالکتریک‌ها به‌عنوان تکنولوژی سبز شناخته شده و جزو منابع انعطاف-پذیر (از نظر گستردگی کاربرد) می‌باشند. از طرفی فاقد گازهای CFC بوده و باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای نمی‌شوند [6,7].

آمر و اینفیلد^۲ [۸] مدل تئوری یک مدول ترموالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. در این مدل، بهینه‌سازی هندسی پایه‌های المنت و عملکرد بهینه‌ی مدول در شرایط تولید توان مورد ارزیابی قرار گرفت. دو سال بعد [۹] آنها موفق شدند، یک متمرکز کننده خورشیدی دو مرحله‌ای برای تولید توان از مدول ترموالکتریک را طراحی کنند.

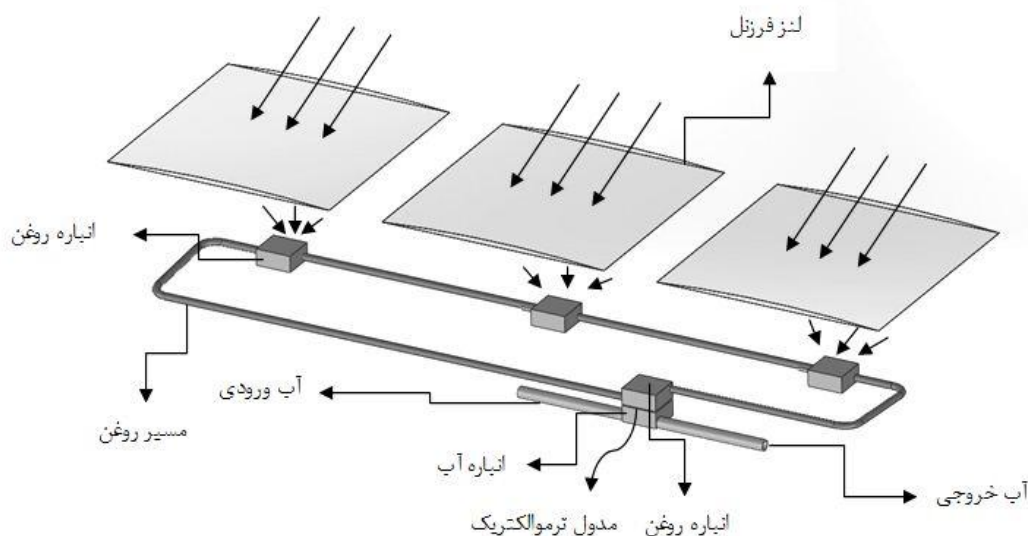
مانیوان و خداری^۳ [۱۰] سیستمی متشکل از کلکتورهای خورشیدی سقفی و ترموالکتریک را طراحی کردند. توان تولید شده در این سیستم، باعث حرکت یک فن جریان محوری برای ایجاد هوای مطبوع اتاق‌های کوچک زیر شیروانی شده است. آنها برای شبیه‌سازی نور خورشید از یک لامپ هالوژنی با توان متغیر بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰W استفاده کردند و موفق شدند به طور تجربی در شدت تابش W/m^2 ۸۰۰ و در هوای محیط بین ۳۰ تا ۳۵ درجه به $1/2W$ توان دست یابند. چامپیر و همکارانش^۴ [۱۱] به طور آزمایشگاهی یک نمونه اجاق آشپزی بیوماس را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. آنها یک محفظه‌ی احتراق با بازدهی بالا طراحی کرده و مدول‌های ترموالکتریک را در دو سمت اجاق نصب کردند. نتایج نشان داد که از ۴ مدول ترموالکتریک حدود $6W$ توان از این اجاق تولید شده است.

² Omer & Infield

³ Maneewan & Khedari

⁴ Champier et. al.

¹ Polymethylmetacrylate(PMMA)



شکل ۱- نمایش نمادین از طرح پیشنهادی برای تولید الکتریسیته و آب گرم از خورشید

شیشه‌ای دو پوسته‌ای تحت خلا مقایسه کردند. مدل تحلیلی آنها تأثیرات پیچیده‌ی پارامترهایی نظیر شدت تابش، دمای آب سرد و غیره را روی ماکزیمم توان خروجی و بازده تبدیل، نشان می‌داد.

آتیک^۶ [۱۵] شبیه‌سازی عددی یک مولد ترموالکتریکی-خورشیدی (STEG) را مورد ارزیابی قرار داد. در مدل او، سمت گرم ترموالکتریک بوسیله‌ی کلکتورهای سهموی گرم شده و سمت سرد مدول بوسیله‌ی آب در دمای ثابت، سرد می‌شد. او همچنین رفتار حرارتی و الکتریکی متمرکز کننده-ها و ترموالکتریک را بررسی کرد.

چن^۷ [۱۶] در مورد بازده تئوری مولد ترموالکتریکی-خورشیدی تحقیقاتی انجام داد. او نتیجه گرفت که برای یک نسبت تمرکز اپتیکی مشخص، دمای بهینه سمت گرم ترموالکتریک بستگی به مواد سازنده آن، ضریب شایستگی بی‌بعد مدول، ویژگی‌های اپتیکی سطوح و بازده نوری سیستم دارد.

در سال ۲۰۱۲، زائو^۸ و همکارانش [۱۷] مدل المان محدود سه بعدی یک مدول ترموالکتریک را بر اساس مواد ترموالکتریکی (بیس‌موت-تلوراید) مورد بررسی قرار دادند. نتایج

نوی‌هید^۱ و دستیارانش [۱۲] یک اجاق ترموالکتریکی خانگی را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها در این اجاق از جریان طبیعی جابه‌جایی جهت سرمایه‌ی سمت سرد ترموالکتریک استفاده نمودند. نتایج نشان داد که توان تولیدی در حالت ماکزیمم در یک مدول ترموالکتریک، حدود $4/2W$ می‌توان بود. همچنین نشان دادند که اگر از چندین مدول ترموالکتریک و یک چاه حرارتی استفاده کنند، توان تولیدی سیستم کاهش می‌یابد.

کریمر^۲ و همکارانش [۱۳] یک کلکتور تخت خورشیدی جدیدی را تشریح کردند که قادر به تولید توان بر اساس اثر سی‌بک و نسبت تمرکز بالا بود. بازده مولد ترموالکتریکی-خورشیدی^۳ (STEG) آنها تحت شدت تابش $1kW/m^2$ حدود ۴/۶ درصد بوده است که ۷-۸ مرتبه بیش‌تر از موارد قبلی گزارش شده در مورد ترکیب پنل‌های تخت خورشیدی و مدول ترموالکتریک می‌باشد.

هی^۴ و دستیارانش [۱۴] ترکیب لوله‌های حرارتی-خورشیدی^۵ با مولد ترموالکتریک (SHP-TEG) را با لوله‌های

¹ Nuwayhid

² Kraemer

³ Solar Thermoelectric Generator

⁴ He

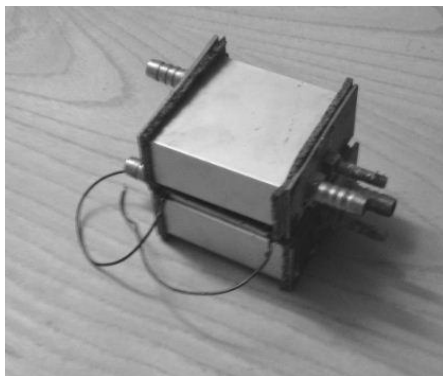
⁵ Solar heat pipe

⁶ Atik

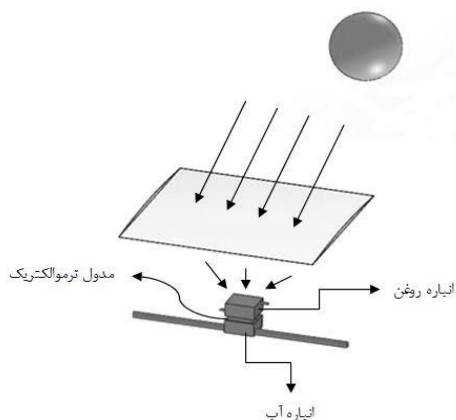
⁷ Chen

⁸ Xiao

در این طرح یک مبدل ترموالکتریک در مرکز کانونی یک لنز فرزنل قرار می‌گیرد. این مبدل در واقع یک مبدل گرمایی مایع به مایع، متشکل از یک مدول ترموالکتریک می‌باشد که در میان دو انباره پر از روغن و آب، قرار گرفته است. لنز فرزنل نور خورشید را به سمت کانون خود متمرکز کرده و چگالی انرژی خورشید را در منطقه کانونی خود افزایش می‌دهد. لذا انباره‌ی روغن که درست در همین منطقه قرار دارد، گرم می‌شود. برای قرار دادن لنز در معرض تابش مستقیم نور خورشید از یک سازه مکانیکی قابل تنظیم استفاده می‌گردد. شکل ۳ نمایی از این طرح مفهومی را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۲- نمونه‌ای از مبدل گرمایی مایع به مایع مجهز به مدول ترموالکتریک



شکل ۳- طرح نمادین از سیستم مورد آزمایش

۴- تشریح سیستم آزمایشگاهی

اجزای اصلی این سیستم شامل یک قاب فلزی از جنس آهن و تک محوره، گیرنده‌ی خورشیدی، یک مبدل ترموالکتریک،

نشان می‌داد که طراحی حرارتی معقولانه یک مولد ترموالکتریک می‌تواند روی خصوصیات مواد ترموالکتریک تاثیر گذاشته و به‌طور موثر باعث بهبود عملکرد الکتریکی مدول شود.

نظر به اینکه مولدهای ترموالکتریک و همچنین لنزهای فرزنل به‌کار برده شده دارای مشخصات فنی ثابتی می‌باشند، برای استفاده بهینه از توانایی تولید برق مولدها، ممکن است لازم گردد گرمای جذب شده به واسطه چند لنز فرزنل برای تولید برق در یک مولد استفاده شود. در محاسبات اولیه طرح، معلوم گردید که با توجه به متوسط شدت تابش خورشید در محل، ابعاد لنز و همچنین مشخصات ترموالکتریک به‌کار برده شده، موضوع استفاده از لنزهای چندگانه در این طرح مصداق می‌یابد. از این‌رو لازم است تا با به‌کارگیری چیدمانی از لنزهای نامبرده، گرمای حاصل از تابش خورشید را جذب نموده و به واسطه یک سیال حامل، آن را به دیواره گرماگیر مولد ترموالکتریک رساند.

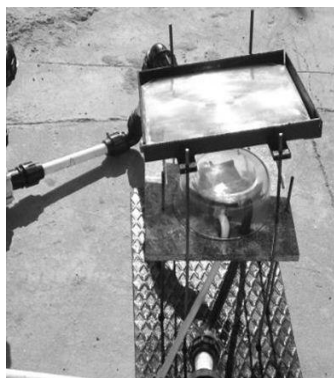
۲- طراحی مفهومی یک سیستم آب‌گرمکن خورشیدی با قابلیت تولید برق

در طرح مفهومی پیشنهادی، نور خورشید به واسطه آرایه‌ای از لنزهای فرزنل در نقطه‌ی کانونی آن متمرکز می‌شود. در مرکز هر لنز، انباره‌هایی پر از روغن قرار دارد که با متمرکز شدن نور خورشید، دمای روغن افزایش یافته و سپس گرمای جذب شده به واسطه این سیال، به انباره آب متصل به مدول ترموالکتریک می‌رسد. نمایش نمادین این طرح در شکل ۱ ملاحظه می‌شود.

به دلیل متمرکز نمودن نور خورشید، مقدار توان گرمایی گسیل شده در واحد سطح افزایش یافته و باعث می‌گردد تا دمای سیال گرماگیر تا حدی که برای تولید برق مناسب باشد، افزایش یابد. مجموعه مدول ترموالکتریک، انباره‌های روغن و آب، یک مبدل گرمایی مایع به مایع مخصوص را می‌سازند که در آن، همزمان با گرم کردن آب، برق نیز تولید می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌ای از این مبدل مشاهده می‌گردد.

۳- طراحی مدل آزمایشگاهی سیستم مورد مطالعه

آزمایش‌ها در روزهای ۱، ۲، ۵ و ۱۰ شهریورماه ۱۳۹۱ در محل دانشگاه صنعتی نوشیروانی واقع در شهر بابل انجام شده است. برای انجام آزمایشات در هر روز آفتابی، ابتدا به دستگاه حدود یک ساعت زمان داده می‌شود تا به حالت پایدار برسد. شروع آزمایشات ساعت ۸ صبح و پایان آن حدود ۱۶ می-باشد. سپس به کمک تابش سنج موقعیت لنز نسبت به خورشید تنظیم شده و سپس تمامی اتصالات و شلنگ‌های ورودی و خروجی آب نیز بررسی می‌گردد. پس از اطمینان از موارد فوق، دستگاه در معرض تابش خورشید قرار داده می-شود. در هر یک از موارد بالا برای کاستن از اثر خطاهای اندازه‌گیری، سه مقدار متفاوت داده‌ها ثبت می‌گردد.



شکل ۴- یک سیستم خورشیدی مورد آزمایش با قابلیت تولید برق و آب گرم

۵- تحلیل نتایج

نخست لازم است تا بیشترین دمای قابل حصول در سطح انباره روغن در شرایطی که هیچ جریان سیالی برای انتقال گرما از سیستم وجود ندارد، ارزیابی گردد. بدین منظور در روز اول شهریورماه ۱۳۹۱ آزمایشی انجام شده است که در آن، دمای سطح جاذب انباره‌ی روغن اندازه‌گیری شد. این آزمایش در حوالی ظهر (که شدت تابش خورشید بیشترین مقدار را داراست)، با بستن مجاری عبور سیالات آب و روغن به انباره‌ها انجام شده بود. بیشترین مقدار گزارش شده برای دمای سطح جاذب 130°C می‌باشد. با فرض اینکه دمای دیواره سرد در 30°C حفظ گردد و نرخ تامین گرما از طریق خورشید به گونه‌ای باشد که دما در دیواره گرم همواره در 130°C قرار داشته باشد، طبق نمودار مشخصه مدول

و لنز فرزنل می‌باشد. قاب نگه دارنده‌ی لنز فرزنل به صورت مکانیزم پیچ و مهره است. از ۴ پیچ متری برای ثابت نگه داشتن لنز استفاده شده است. این مکانیزم تک محوره (شمالی-جنوبی) بوده و با تغییر ارتفاع هر کدام از پیچ‌ها، لنز فرزنل به سمت جهت مورد نظر تنظیم می‌شود. لنز به کار رفته شده در این تحقیق در ابعاد (30×30) سانتی‌متر مربع و از نوع متمرکز کننده‌ی نقطه‌ای می‌باشد.

سمت گرم مبدل ترموالکتریک روغن داغ و سمت سرد آن آب سرد با دبی 0.02 kg/s می‌باشد. یک ترموالکتریک از نوع تولید توان با مشخصات "TEPI-12656-0.6" در این سیستم به کار رفته است. برای جلوگیری از اتلافات حرارتی، این مبدل را در داخل یک حباب شیشه‌ای قرار داده و هوای داخل آن با یک پمپ خلا خارج شده است. سطوح این مبدل را به صورت زبر و با رنگ تیره ساخته، تا از اتلافات تابشی جلوگیری شود. جنس این مبدل از آلومینیوم بوده و از دو تا درپوش فلزی و دو تا واشر چوب پنبه‌ای نسوز تشکیل شده است. برای آب‌بندی مبدل و جلوگیری از ورود هوا به داخل حباب شیشه‌ای، از چسب سیلیکونی مزدا استفاده شده است. این حباب شیشه‌ای توسط پیچ متری بر روی یک چوب از جنس نئوپان در ابعاد (28×28) سانتی‌متر مربع سوار شده است. همچنین تمامی شلنگ‌هایی که برای ورودی و خروجی روغن به کار رفته، همگی از جنس نسوز می‌باشد. برای اندازه‌گیری توان تابشی خورشید از یک تابش سنج از نوع "TES 1333R" و برای اندازه‌گیری دما از دو دماسنج لیزری و ترموکوپلی استفاده شده است. دماسنج لیزری ساخت شرکت بلو گیزمو ۱ و با مدل BG 42 می‌باشد. بازده‌ی دمایی که این دستگاه اندازه‌گیری می‌کند از ۲۰- تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی-گراد می‌باشد [18]. دماسنج ترموکوپلی‌ای که برای اندازه‌گیری دمای آب به کار می‌رود، محصول شرکت آمنی اینسترومنت ۲ بوده و مدل آن Testo 915-1 می‌باشد [19]. یک ولت متر از نوع Hioki 3200 نیز برای اندازه‌گیری ولتاژ ترموالکتریک استفاده می‌شود. شکل ۴ سیستم خورشیدی ساخته شده را نشان می‌دهد.

¹ Blue Gizmo

² Omni Instrument

برای ارزیابی قابلیت تولید توان الکتریکی مدول استفاده شده، با استناد به مقادیر اندازه‌گیری شده برای ولتاژ مدار باز مدول و روابط ریاضی توصیف کننده مدارهای الکتریکی، می‌توان ماکزیمم توان قابل استحصال از مدول و همچنین شدت جریان مدار (در این توان) را محاسبه نمود. با لحاظ نمودن توان تابشی رسیده به سطح لنز فرزنل نیز می‌توان بازده الکتریکی کل سیستم را بدست آورد.

بر این اساس، داده‌هایی که مبین رفتار ترموالکتریک سیستم، در روزهای آزمایش می‌باشند، محاسبه می‌گردند که نمونه‌ای از آن در جدول ۲ ثبت شده است. توان، جریان و بازده الکتریکی مدول ترموالکتریک به ترتیب از روابط (۱) تا (۳) محاسبه خواهند شد.

$$P = \frac{V^2}{4R} \quad (1)$$

$$I = \frac{V}{2r} \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{P}{I_{FL}} \times 100 \quad (3)$$

که در روابط فوق، V ولتاژ تولیدی مدار باز، I جریان الکتریکی در شرایط ماکزیمم توان^۲، $r = 1.2\Omega$ مقاومت داخلی مدول و P ماکزیمم توان تولیدی ترموالکتریک هستند.

همچنین η_e (بازده الکتریکی کل) نیز برابر است با نسبت توان الکتریکی تولیدی بر توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل.

رابطه زمانی ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در طول روز به تفکیک روزهای آزمایش در شکل ۶ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در ابتدا (ساعات نزدیک به صبح) به دلیل کم بودن تابش خورشید و پایین بودن دمای سمت گرم ترموالکتریک، میزان توان تولیدی بسیار کم است. لذا رفته رفته با افزایش تابش خورشید میزان توان دریافتی لنز فرزنل افزایش یافته و این امر سبب ازدیاد دمای سمت گرم ترموالکتریک می‌شود. هرچقدر اختلاف دمای سمت گرم و سرد ترموالکتریک بیشتر شود، میزان توان الکتریکی تولیدی آن نیز بیشتر است.

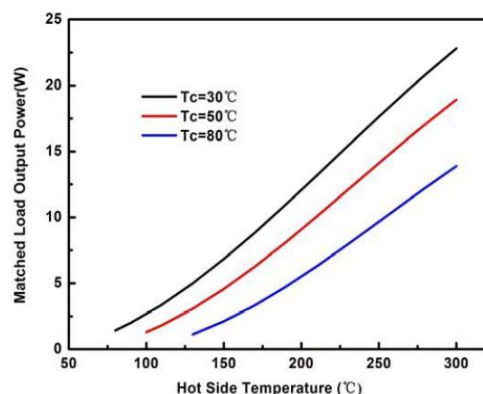
ترموالکتریک استفاده شده که در شکل ۵ نشان داده شده است، ماکزیمم توان الکتریکی قابل استحصال برابر با ۶W می‌باشد. در سه روز دیگر با انجام آزمایش‌هایی که در آن‌ها جریان آب شهری با دبی 0.02 kg/s در انباره برقرار است، پتانسیل سیستم طراحی شده برای تولید برق و آب گرم، مورد بررسی قرار گرفت.

با لحاظ نمودن یک بازه یک ساعته در شروع آزمایش برای پایدار شدن شرایط دمایی سیستم، داده‌برداری در بازه‌های یک ساعته انجام می‌پذیرد که در هر مرحله ۵ نوع داده به شرح ذیل ثبت شده است:

T_{c1} : دمای سمت گرم (اتصال گرم)^۱ ترموالکتریک، T_{c2} : دمای آب ورودی به انباره، T_{c3} : دمای آب خروجی از انباره، V : ولتاژ تولیدی مدار باز ترموالکتریک، I_t : توان تابشی خورشید در واحد سطح

سپس برای انجام محاسبات تکمیلی، با پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده، مقادیر ذیل محاسبه می‌گردد:

T_c : میانگین دمای آب در انباره، ΔT : اختلاف دمای سمت گرم و میانگین دمای آب در انباره، I_{FL} : توان تابشی خورشید در سطح لنز فرزنل. برای نمونه، مقادیر ثبت شده برای آزمایش‌های انجام شده در روز دوم شهریور در جدول ۱ آمده است.



شکل ۵- نمودار توان خروجی ترموالکتریک در حالت ماکزیمم بر حسب دما [20]

۵-۱- تولید توان الکتریکی

² Matched Load

¹ Hot junction

ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید در دوره آزمایش $1/0.8W$ بوده که در ساعت ۱۲ روز دوم شهریور ثبت شده است. همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی توان الکتریکی مشاهده می‌گردد که مجموع انرژی الکتریکی قابل تولید در طول روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ برابر با $9/8$ ، $10/83$ و $9/78kJ$ است.

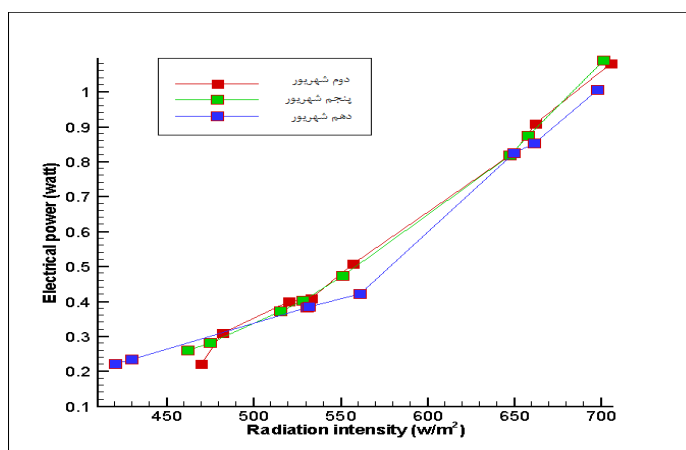
در ساعات پایانی روز هم به دلیل کم شدن تابش خورشید، توان تولیدی ترموالکتریک کاهش می‌یابد. این موضوع به خوبی در شکل ۶ نمایان است. در تمامی روزهای آزمایش همواره در ساعات نزدیک به ظهر (بیشترین شدت تابش خورشید) میزان توان تولیدی نسبت به بقیه‌ی ساعات بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که

جدول ۱- داده‌های مربوط به روز دوم شهریور

$I_{FL}(W)$	$I_t(W/m^2)$	V(Volt)	$\Delta T(^{\circ}C)$	$T_c(^{\circ}C)$	$T_{c2}(^{\circ}C)$	$T_{c1}(^{\circ}C)$	$T_h(^{\circ}C)$	Time
۴۲/۳	۴۷۰	۱/۰۲۹	۲۱/۲۳	۱۹/۹۸	۲۰/۸۴	۱۹/۱۳	۴۱/۲۱	۹
۴۸	۵۳۳/۴۴	۱/۳۹۹	۵۰	۲۰/۲۲۵	۲۱/۳۲	۱۹/۱۳	۷۰/۵۲	۱۰
۵۸/۵	۶۵۰/۱۱	۱/۹۹	۶۰/۳۱	۲۰/۸۸	۲۲/۶۳	۱۹/۱۳	۸۱/۱۴	۱۱
۶۳/۵	۷۰۵/۹۸	۲/۲۷۷	۷۰/۱۴	۲۱/۱	۲۳/۰۷	۱۹/۱۳	۹۱/۲۴	۱۲
۵۹/۵۹	۶۶۲/۲۱	۲/۰۸۷	۶۱/۷۵	۲۱	۲۲/۸۷	۱۹/۱۳	۸۲/۷۵	۱۳
۵۰/۱۴	۵۵۷/۱۲	۱/۵۶	۵۲/۹۶	۲۱/۵۳	۲۱/۹۳	۱۹/۱۳	۷۳/۴۹	۱۴
۴۶/۸۱	۵۲۰/۱۲	۱/۳۸۴	۳۹/۰۴	۲۰/۱	۲۱/۰۷	۱۹/۱۳	۵۹/۱۴	۱۵
۴۳/۴	۴۸۲/۳۲	۱/۲۱۷	۳۵/۱۱	۲۰/۰۴	۲۰/۹۵	۱۹/۱۳	۴۲/۱۷	۱۶

جدول ۲: داده‌های مبین رفتار ترموالکتریک سیستم در روز دوم شهریور

$\eta_e(\%)$	$I_{FL}(W)$	$P_0(W)$	I(A)	V(Volt)	Time
۰/۵۲	۴۲/۳	۰/۲۲۰۴	۰/۴۲۸۶	۱/۰۲۹	۹
۰/۸۵	۴۸	۰/۴۰۷۸	۰/۵۸۳	۱/۳۹۹	۱۰
۱/۴۱	۵۸/۵	۰/۸۲۵۳	۰/۸۲۹۳	۱/۹۹	۱۱
۱/۷	۶۳/۵	۱/۰۸	۰/۹۴۸۷	۲/۲۷۷	۱۲
۱/۵	۵۹/۵۹	۰/۹۰۷۳	۰/۸۶۹۵	۲/۰۸۷	۱۳
۱/۰۱	۵۰/۱۴	۰/۵۰۶۸	۰/۶۴۹۹	۱/۵۶	۱۴
۰/۸	۴۶/۸۱	۰/۳۹۹	۰/۵۷۶۶	۱/۳۸۴	۱۵
۰/۷	۴۳/۴	۰/۳۰۸۴	۰/۵۰۷	۱/۲۱۷	۱۶



شکل ۶- نمودار ماکزیمم توان الکتریکی تولیدی در روزهای مختلف آزمایش

۵-۲- تولید آب گرم

برای ارزیابی قابلیت تولید آب گرم توسط سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه، با استناد به مقدار اندازه‌گیری شده برای دمای آب ورودی به انباره، دمای آب خروجی از انباره، دبی آب گذرنده در انباره و همچنین روابط ترمودینامیکی، می‌توان توان گرمایی قابل استحصال از سیستم را محاسبه نمود. همچنین با لحاظ نمودن توان تابشی رسیده به سطح لنز فرزنل می‌توان بازده گرمایی کل سیستم را محاسبه کرد. میزان انتقال حرارت و همچنین راندمان حرارتی را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد.

$$\dot{Q}_w = \dot{m} c_p \Delta T_w \quad (4)$$

$$\Delta T_w = T_{hw} - T_{cw} \quad (5)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_w}{I_{FL}} \times 100 \quad (6)$$

بر این اساس، داده‌هایی که مبین رفتار تبدیل گرمای سیستم، در روزهای آزمایش می‌باشند، محاسبه و در جداولی ثبت می‌گردد که نمونه آن در جدول ۳ نشان داده شده است. عنوان داده‌های ثبت شده در جدول نامبرده به شرح ذیل می‌باشد:

T_{cw} : دمای آب ورودی (آب سرد)

T_{hw} : دمای آب خروجی (آب گرم)

ΔT_w : اختلاف دمای آب ورودی و خروجی

\dot{Q} : توان گرمایی منتقل شده به آب در حالت مدار باز الکتریکی؛ این توان که به واسطه مدول ترموالکتریک به انباره آب وارد می‌شود که در آن \dot{m} دبی آب با مقدار

0.002 kg/s و C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب با مقدار 4180 J/kg.C و ΔT_w ، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی می‌باشد.

η_{th} : بازده گرمایی کل؛ نسبت توان گرمایی تولیدی بر توان تابشی دریافت شده در سطح لنز فرزنل در شرایط مدار باز الکتریکی

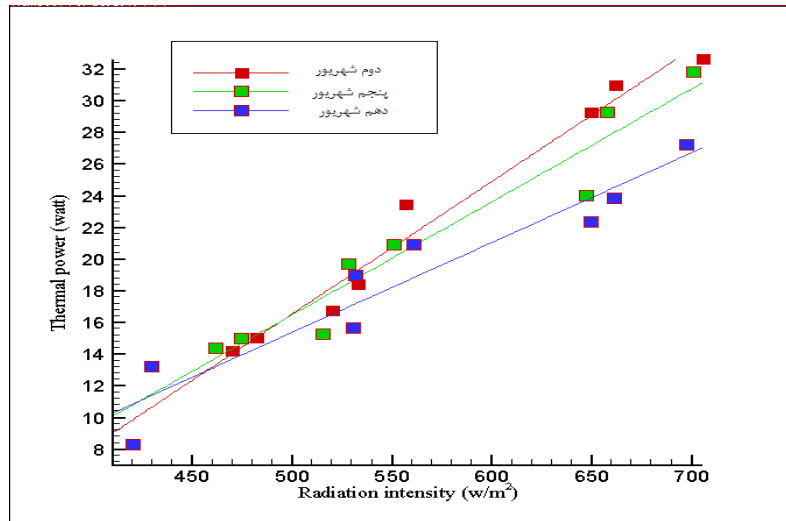
η_{TEG} : بازده الکتریکی مدول ترموالکتریک با احتساب گرمای گذرنده بر مدول؛ برابر است با $\eta_{TEG} = P_{ML}/\dot{Q}$ رابطه زمانی توان گرمایی تولیدی در طول یک روز به تفکیک روزهای آزمایش در شکل ۷ ترسیم شده است.

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش شدت تابش، توان گرمایی جذب شده در آب نیز افزایش می‌یابد. علت آن این است که لنز فرزنل انرژی بیشتری را در نقطه کانونی خود متمرکز می‌کند. این موضوع باعث افزایش دمای سیال واسط در سمت گرم ترموالکتریک شده و لذا توان حرارتی بیشتری به آب انتقال می‌یابد. در ساعات پایانی روز هم به دلیل کاهش شدت تابش، دمای سیال واسط افت محسوسی داشته و همین عامل سبب کاهش توان حرارتی منتقل شده به آب، می‌گردد.

همچنین با محاسبه سطح زیر منحنی توان گرمایی، مشاهده می‌شود که مجموع انرژی مصرف شده برای گرم کردن آب در طول روزهای آزمایش به ترتیب تاریخ برابر با $195/72$ ، $190/53$ و $183/53 \text{ kJ}$ است.

جدول ۳- داده‌های مربوط به تولید آب گرم در روز دوم شهریور

η_{TEG} (%)	η_{th} (%)	P(W)	Q(W)	I_{FL} (W)	ΔT_w (°C)	T_{hw} (°C)	T_{cw} (°C)	Time
۱/۵۱	۳۳/۷۸	۰/۲۲۰۴	۱۴/۲۹	۴۲/۳	۱/۷۱	۲۰/۸۴	۱۹/۱۳	۹
۲/۱۷	۳۸/۱۴	۰/۴۰۷۸	۱۸/۳	۴۸	۲/۱۹	۲۱/۳۲	۱۹/۱۳	۱۰
۲/۷۴	۴۸/۵۸	۰/۸۲۵۳	۲۹/۲۶	۴۸/۵	۳/۵	۲۲/۶۳	۱۹/۱۳	۱۱
۳/۱۷	۵۱/۸۵	۱/۰۸	۳۲/۹۳	۶۳/۵	۳/۹۴	۲۳/۰۷	۱۹/۱۳	۱۲
۲/۸۲	۵۲/۴۵	۰/۹۰۷۳	۳۱/۲۶	۵۹/۵۹	۳/۷۴	۲۲/۸۷	۱۹/۱۳	۱۳
۲/۱۱	۴۶/۶۶	۰/۵۰۶۸	۲۳/۴	۵۰/۱۴	۲/۸	۲۱/۹۳	۱۹/۱۳	۱۴
۲/۴	۳۴/۶۲	۰/۳۹۹	۱۶/۲۱	۴۶/۸۱	۱/۹۴	۲۱/۰۷	۱۹/۱۳	۱۵
۱/۹۵	۳۵/۰۴	۰/۳۰۸۴	۵۱/۲۱	۴۳/۴	۱/۸۲	۲۰/۹۵	۱۹/۱۳	۱۶



شکل ۷- نمودار توان گرمایی جذب شده در آب در روزهای مختلف آزمایش

جدول ۴- توان الکتریکی محاسبه شده در سه حالت اندازه‌گیری در روز پنجم شهریور

Uncertainty (%)	Standard Deviation	Mean	Test3	Test2	Test1	Time
۳/۰۴۵	۰/۰۰۸	۰/۲۶۰	۰/۲۶۶	۰/۲۶۲	۰/۲۵۱	۹
۲/۱۷۸	۰/۰۰۹	۰/۴۰۱	۰/۳۹۳	۰/۴۰۰	۰/۴۱۱	۱۰
۰/۹۵۶	۰/۰۰۸	۰/۸۱۶	۰/۸۱۳	۰/۸۱۰	۰/۸۲۵	۱۱
۲/۲۰۴	۰/۰۲۳	۱/۰۳۷	۱/۰۵۳	۱/۰۴۸	۱/۰۱۱	۱۲
۱/۳۵۷	۰/۰۱۲	۰/۸۷۳	۰/۸۶۳	۰/۸۸۶	۰/۸۷۰	۱۳
۲/۲۷۹	۰/۰۱۱	۰/۴۷۱	۰/۴۷۳	۰/۴۸۱	۰/۴۵۹	۱۴
۱/۱۷۸	۰/۰۰۴	۰/۳۷۱	۰/۳۷۱	۰/۳۷۵	۰/۳۶۶	۱۵
۰/۵۲۶	۰/۰۰۱	۰/۲۸۱	۰/۲۸۱	۰/۲۸۰	۰/۲۸۳	۱۶

جدول ۵- توان گرمایی محاسبه شده در سه حالت اندازه‌گیری در روز پنجم شهریور

Uncertainty (%)	Standard Deviation	Mean	Test3	Test2	Test1	Time
۱/۰۶۳	۰/۱۵۳	۱۴/۳۶۷	۱۴/۵	۱۴/۴	۱۴/۲	۹
۰/۵۸۸	۰/۱۱۵	۱۹/۶۳۳	۱۹/۷	۱۹/۵	۱۹/۷	۱۰
۱/۸۵۶	۰/۴۴۵	۲۳/۹۹۰	۲۴/۴	۲۴/۱	۲۳/۵	۱۱
۰/۴۸۱	۰/۱۵۳	۳۱/۷۶۷	۳۱/۸	۳۱/۶	۳۱/۹	۱۲
۰/۵۲۲	۰/۱۵۳	۲۹/۲۶۷	۲۹/۳	۲۹/۱	۲۹/۴	۱۳
۱/۴۹۲	۰/۲۵۲	۱۶/۸۶۷	۱۷/۱	۱۶/۶	۱۶/۹	۱۴
۱/۷۴۱	۰/۳۶۵	۱۵/۲۰۰	۱۵/۰	۱۵/۱	۱۵/۵	۱۵
۲/۴۱۹	۰/۲۸۹	۱۱/۹۳۳	۱۲/۱	۱۱/۶	۱۲/۱	۱۶

قادر به تامین گرمای لازم برای تولید برق حداکثری مدول ترموالکتریک استفاده شده، نمی‌باشد. از این‌رو، با توجه به اینکه لنزهای موجود در بازار کشور (عمدتاً برای استفاده در دستگاه‌های اپتیکی ویدئو پروژکتور وارد کشور می‌شوند) دارای ابعاد ثابت (شبه نمونه مورد آزمایش) بوده و قیمت مدول‌های ترموالکتریک موجود در بازار به مراتب بسیار بالاتر از قیمت لنزها می‌باشد و همچنین به دلایل فنی دیگری همچون قابلیت محافظت بهتر کلکتور در برابر جریان باد، طرح چند لنزی برای جمع‌آوری گرمای مورد نیاز یک مدول پیشنهاد گردید. در این طرح پیشنهادی برای انتقال گرما از سیال، روغن معدنی استفاده می‌شود.

برای بررسی امکان سنجی طرح پیشنهادی، یک سیستم آزمایشگاهی نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج بدست آمده در روزهای مختلف آزمایش نشان داده است که با توجه به عایق‌بندی‌های دستگاه ساخته شده، حداکثر دمای قابل دسترس در سطح انباره روغن در روز یکم شهریور، برابر با 130°C می‌باشد.

بیشترین راندمان حرارتی سیستم مذکور حدود $52/45$ درصد می‌باشد که در ساعت ۱۳ روز دوم شهریور ثبت شده است. در این ساعت، میزان توان حرارتی منتقل شده به آب $31/26\text{W}$ می‌باشد. همچنین مشخص شد که اگر از آب شهری، با دبی $0/02\text{kg/s}$ و دمای اولیه‌ای در حدود 19°C ، برای خنک کردن مدول ترموالکتریک استفاده شود، حداکثر توان الکتریکی قابل استحصال برابر با $1/038\text{W}$ است. بر اساس داده‌های بدست آمده و همچنین با استناد به مشخصات فنی مدول ترموالکتریک استفاده شده، مشخص شد که می‌بایستی حداقل از ۶ لنز در طرح پیشنهادی استفاده شود. در این حالت با توجه به عایق‌بندی‌های انجام شده در مسیر انتقال انرژی از سطح لنز به مدول ترموالکتریک، حداکثر توان قابل استحصال در طرح پیشنهادی در حدود ۶ وات پیش‌بینی می‌شود.

مراجع

- [1] Xiea WT, Daia YJ, Wanga RZ, Sumathy K (2011) Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review 2011: Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 2588–2606.
- [2] Leutz R, Suzuki A (2001) Nonimaging Fresnel lenses: design and performance of solar concentrators Heidelberg: Springer Verlag.

به منظور افزایش دقت نتایج، شدت تابش خورشید، ولتاژ تولیدی ترموالکتریک و دمای نقاط مختلف در هر مورد برای سه مرتبه اندازه‌گیری شده و از متوسط آنها برای تحلیل نتایج استفاده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده در سه حالت به همراه میانگین، انحراف استاندارد و درصد عدم قطعیت نتایج برای توان الکتریکی و حرارتی تولیدی برای روز پنجم شهریور به ترتیب در جدول ۴ و ۵ نشان داده شده است. با توجه به درصد عدم قطعیت بدست آمده، مشهود است که نتایج اندازه‌گیری شده از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده‌اند.

۶- بهینه‌سازی طرح پیشنهادی

با توجه به مقدار اسمی ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید توسط مدول ترموالکتریک و توان‌های ثبت شده در آزمایشات، می‌توان نتیجه گرفت که برای استفاده از حداکثر ظرفیت تولید برق مدول، می‌بایستی آرایه‌ای از لنزهای فرزنل را در یک طرح مهندسی شده به کار گرفت. با استناد به داده‌های فنی مدول استفاده شده، ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید 14W ذکر شده است. این مقدار توان در شرایطی که دمای سمت گرم و سرد مدول به ترتیب 250°C و 50°C باشد، رخ می‌دهد. نظر به این‌که در شرایط توصیف شده در طرح مورد مطالعه، با توجه به عایق‌بندی‌های انجام شده، حداکثر دما در اتصال گرم مدول ترموالکتریک می‌تواند 130°C باشد و همچنین فرض کنیم متوسط دمای آب در اتصال سرد مدول 30°C باشد، مطابق نمودار شکل ۵ حداکثر توان قابل استحصال در حدود 6W ارزیابی می‌گردد.

با لحاظ کردن شرایط ماکزیمم توان الکتریکی قابل تولید که طبق آزمایش‌های انجام شده در ساعت ۱۲ روز دوم شهریور بوده و مقدار آن برابر $1/08\text{W}$ ثبت شده است، تعداد لنزهای لازم برابر با ۶ برآورد می‌گردد. قابل ذکر است که تعداد برآورد شده برای طرح بهینه، کمترین مقدار آن می‌باشد. در چنین طرحی در شرایطی حداکثر توان 6W قابل استحصال است که شدت تابش خورشید در حدود مقدار آن در روز اول آزمایش (یکم شهریور ۱۳۹۱) باشد. از این‌رو تعداد لنزهای لازم بهتر است بیش از ۶ عدد باشد.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داده است که با توجه به شدت تابش خورشید بر واحد سطح در محل آزمایش‌ها، چنین ابعادی از لنزفرزنل

- power of thermoelectric roof solar collector. *Renewable Energy* 29: 743–752.
- [11] Champier D, Bedecarrats JP, Rivaletto M, Strub F (2010) Thermoelectric power generation from biomass cook stoves. *Energy* 35: 935–942.
- [12] Nuwayhid RY, Shihadeh A, Ghaddar N (2005) Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling. *Energ Convers Manage* 46: 1631–1643.
- [13] Kraemer D, Poudel B, Feng H-P, Caylor JC, Yu B, Yan X, et al. (2011) High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. *Nat Mater* 10: 532–538.
- [14] He W, Su YH, Riffat SB, Hou JX, Ji J (2011) Parametrical analysis of the design and performance of a solar heat pipe thermoelectric generator unit. *Appl Energy* 88: 5083–5089.
- [15] Atik K (2011) Numerical simulation of a solar thermoelectric generator. *Energ Source Part A* 33: 760–767.
- [16] Chen G (2011) Theoretical efficiency of solar thermoelectric energy generators. *J Appl Phys* 109: 104908-1-8.
- [17] Xiao JS, Yang TQ, Li P, Zhai PC, Zhang QJ (2012) Thermal design and management for performance optimization of solar thermoelectric generator. *Appl Energy* 93: 33–38.
- [18] BG 42 Infrared thermometer, catalog.
- [19] Thermometer with robust penetration probe catalog- Testo 915-1
- [20] Specification of Thermoelectric Module: TEP1-12656-0.6.
- [3] O'Neil MJ, Piszczor MF, Eskenazi MI, McDanal AJ, George PJ, Botke MM, et al. (2003) Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications. In *Proceeding of the SPIE* 5179: 116–26.
- [4] Alkan C, Sekerci M, Kunc S (1995) Production of hydrogen using Fresnellens-solar electrochemical cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 20(1): 17–20.
- [5] Ohkubo T, Yabe T, Yoshida K, Uchida S, Funatsu T, Bagheri B, et al. (2009) Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens. *Optics Letters* 34(2): 175–7.
- [6] Khedari J, Maneewan S, Pratinthong N, Chimchaveed W, Hirunlabhe J (2001) Domestic hot water system combining solar and waste heat from thermoelectric air-conditioner. *Int J Ambient Energy* 22: 19–28.
- [7] Maneewan S, Khedari J, Lertsatitthanakorn C, Hirunlabh J (2001) Economical feasibility study of solar hot water system combining waste heat from thermoelectric air-conditioner. *Proceeding of the 15th ME-NETT Conference*, October, 2001, Thailand, EM 68-72.
- [8] Omer SA, Infield DG (1998) Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation. *Sol Energy Mat Sol C* 53: 67–82.
- [9] Omer SA, Infield DG (2000) Design and thermal analysis of a two stage solar concentrator for combined heat and thermoelectric power generation. *Energ Convers Manage* 41: 737–56.
- [10] Maneewan S, Khedari J, Zeghmami B, Hirunlabh J, Eakburanawat (2004) Investigation on generated