



ساخت و شبیه سازی سیستم بازیافت انرژی خورشیدی با استفاده از فناوری ترموالکتریک

محمد صائمیان^{۱*}، نادر رهبر^۲

۱- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، ایران، پست الکترونیک energy1988mohammad@gmail.com

چکیده

این پژوهش، سیستم بازیافت انرژی خورشیدی با استفاده از فناوری ترموالکتریک در راستای تولید ولتاژ الکتریکی را ارائه می نماید. به طور کلی سیستم بازیافت ساخته شده از سه بخش اصلی شامل یک ترموالکتریک ژنراتور، یک عدسی محدب و یک هیتسینک حرارتی از جنس آلومینیوم تشکیل شده است و مهمترین ویژگی سیستم بازیافت ارائه شده، ساختار و طراحی ساده، بدون پیچیدگی و قیمت مناسب آن می باشد که در طراحی سیستم بازیافت، یک سمت ترموالکتریک توسط انرژی خورشید گرم و سمت دیگر ترموالکتریک توسط هیتسینک حرارتی از جنس آلومینیوم که در معرض آب یک رودخانه در منطقه ای از تهران قرار دارد، خنک می شود. در نتیجه، گرادیان دما در دو سمت مولد ترموالکتریک جاری شده که این امر بازیافت انرژی خورشیدی و در نتیجه ولتاژ و توان الکتریکی را به همراه خواهد داشت. آزمایشات تجربی در روز تابستان (۲۳ اوت ۲۰۱۹) در شمال غرب شهر تهران، منطقه کن انجام شده است (۵۱،۱۵۰۶،۶" ۵۱،۱۵۰۶،۶" ۳۴،۴۷۵۰،۶). برای ارزیابی سیستم ارائه شده در جهت بازیافت انرژی خورشیدی، پس از ساخت آن، تمامی داده ها و پارامترهای اثرگذار در دو سمت ترموالکتریک ژنراتور در حین آزمایش در هر ده دقیقه ثبت شده و سپس سیستم بازیافت و اطلاعات ثبت شده در نرم افزار حلگر معادلات مهندسی به صورت کد، شبیه سازی شده اند. نتایج حاصل از بررسی به صورت نمودار و جدول نمایش داده شده اند که با توجه به آزمایش های عملی انجام شده، مهمترین پارامتر در این پژوهش، اختلاف دما بین دو طرف ترموالکتریک ژنراتور می باشد. بر اساس آزمایش های عملی ماکزیمم ولتاژ خروجی مدار بازیافت در اختلاف دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، ۲۲۹ میلی ولت گزارش شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۷ آبان ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

ارائه در سایت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژگان

ترموالکتریک ژنراتور

ولتاژ خروجی

بازیافت انرژی خورشیدی

گرادیان دما

عدسی محدب

هیتسینک حرارتی

Construction and simulation of solar energy recovery system with thermoelectric technology

Mohammad Saemian^{1*}, Nader Rahbar²

1- Master of mechanical engineering, Center for Sustainable Energy Research and Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Assistant Professor, Center for Energy Research and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* Semnan, Iran < P.O.B.; energy1988mohammad@gmail.com

Article Information

Original Research Paper

Received 7 November 2020

Accepted 13 February 2021

Available Online 13 February

ABSTRACT

This research presents a solar energy recycling system using thermoelectric technology to generate electrical voltage. In general, the recycling system is made of three main parts, including a thermoelectric generator, a convex lens and a thermal heatsink made of aluminum. The most important feature

Please cite this article using:

Mohammad Saemian, Nader Rahbar, Construction and simulation of solar energy recovery system with thermoelectric technology, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 4, pp. 18-31, 2020-2021 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

2021

Keywords

Thermoelectric generator
output voltage
solar energy recycling,
temperature gradient
convex lens
thermal heat sink

of the proposed recycling system is its simple structure and design, without complexity and reasonable price. In the design of the recycling system, one side of thermoelectric is cooled by rays of sun and the other side of thermoelectric is cooled by an aluminum thermal heatsink that is exposed to the water of a creek in an area of Tehran. As a result, a temperature gradient flows on both sides of the thermoelectric generator, which recovers solar energy, resulting in voltage and electrical power. Experimental experiments were performed on a summer day (August 23, 2019) in the northwest of Tehran, Kan region ("51.1506.6" 34.4750.6). To evaluate the proposed system for solar energy recovery, after its construction, all data and effective parameters on both sides of the thermoelectric generator during the test are recorded every ten minutes and then the recycling system and information recorded in the engineering equation solver software as codes. The results of the study are shown in the form of graphs and tables so according to practical experiments, the most important parameter in this study is the temperature difference between the two sides of thermoelectric generator. Based on practical tests, the maximum output voltage of the recycling circuit at a temperature difference of 25 °C is reported to be 229 mV.

۱- مقدمه

انرژی یک امر ضروری برای ادامه زندگی است. انرژی الکتریکی بخشی از زندگی روزمره انسان است. نگرانی در مورد اثرات زیست محیطی و به دست آوردن و تبدیل آن به شکل های دیگر نقش مهمی در تولید انرژی دارد. منابع معدنی مانند گاز طبیعی و نفت که در حال اتمام بوده و به عنوان انرژی تجدیدناپذیر طبقه بندی می شوند [۱]. همچنین استفاده گسترده از سوخت های فسیلی توسط فعالیت های انسانی منجر به مشکلات جدی جوی و محیطی شده است. در نتیجه، گرم شدن کره زمین، انتشار گازهای گلخانه ای، تغییرات آب و هوا، تخلیه لایه ازن و باران اسیدی به طور مکرر به همراه خواهد داشت [۲]. برای کاهش تأثیر مشکلات فوق، مبدل های انرژی حرارتی به عنوان یکی از فناوری های ممکن برای این منظور ارائه شده است و یکی از مهمترین فناوری های کاربردی، فناوری ترموالکتریک در جهت تولید برق از منابع حرارتی، به ویژه گرمای تلف شده یا منابع حرارتی آزاد مانند انرژی خورشیدی است. انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع تمیز انرژی پاک و تقریباً غیر قابل تخریب و همچنین به عنوان یک انرژی تجدید پذیر شناخته می شود که می توان به اشکال دیگر انرژی مانند گرما و برق تبدیل کرد [۳،۴]. علاوه بر این، سیلابی از تحقیقات با تمرکز بر انرژی تجدید پذیر توسط دانشمندان که انرژی خورشیدی را فراوان ترین منبع انرژی می دانند که می تواند خواسته های جامعه را برآورده کند انجام شده است که ناشی از توسعه مداوم اقتصادی است [۵،۶]. در سال های اخیر ماژول های ترموالکتریک برای مطالعات مختلف مورد استفاده قرار

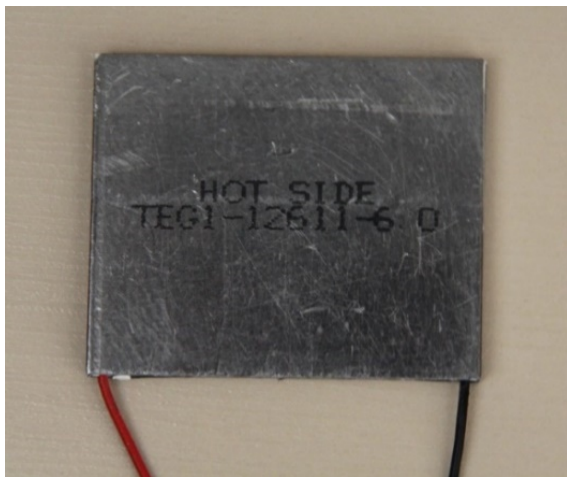
گرفته اند و به دلیل عدم داشتن قطعات متحرک و مکانیکی بودن آن، کوچک و بی سر و صدا، وزن کم، عدم تولید آلودگی و سازگار با محیط زیست برای تولید انرژی الکتریکی بسیار پرمخاطب می باشند [۷]. علاوه بر این مهمترین مزیت ترموالکتریک توانایی آنها در تبدیل مقادیر کم گرما به الکتریسیته با اطمینان بالا و عمر بسیار طولانی آنهاست [۸،۹]. عملکرد ترموالکتریک ها نشان می دهد که آنها سازگار با محیط زیست هستند که در نتیجه باعث انتشار کمتر کربن می شوند که این امر کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و از این رو کاهش اثرات گرم شدن کره زمین را به دنبال دارند [۱۰].

بسیاری از مطالعات نظری و تجربی با استفاده از ماژول ترموالکتریک ژنراتور در گرمای زباله یا سیستمهای متمرکز خورشیدی گزارش شده است [۱۱،۱۲،۱۳]. یکی از اولین تحقیقات در زمینه تولید انرژی از انرژی خورشیدی با استفاده از ترموالکتریک توسط گلد اسمید و همکاران گزارش شده است [۱۴]. آنها بهره وری از یک ترموالکتریک تلورید- بیسموت مورد استفاده در یک جمع کننده صفحه تخت و یک جمع کننده غلظت ثابت نامتقارن در تولید برق از شدت خورشید را بررسی کردند. نتایج آنها حاکی از آن است که کارایی کلی آنها برای سیستم سابق یک درصد و برای سیستم بعدی، سه درصد است. در یک مطالعه دیگر، ارزیابی عملکرد ژنراتور دما با دمای بالا تحت غلظت های مختلف خورشیدی توسط محمودی نژاد و همکارانش گزارش شده است [۱۵]. در این تحقیق، یک

با جمع کننده های خورشیدی سهموی را در نظر می گیرد و سیستم دوم، ژنراتورهای حرارتی بین مبدلهای حرارتی خورشیدی و چرخه رنکین آلی اول گنجانیده شده اند. نتایج آنها نشان می دهد که افزایش در سرعت جریان انبوه مایعات انتقال حرارت خورشیدی باعث افزایش قابل توجه در کار توسط توربین ها و ژنراتورهای حرارتی می شود. سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستمهای متداول متناظر براساس تولید ترموالکتریک دارای ویژگیهای برتر و منحصر به فرد است. در تحقیقی دیگر هسو و همکاران [۲۳] نتیجه گرفتند که برای هر نوع ترموالکتریک ژنراتور به کار رفته، علاوه بر حداکثر شیب دمای مجاز، خروجی بسته به نیروی بستن نیز افزایش می یابد. همچنین پیشنهاد شد که نیروی بستن نباید از ۱۸ کیلو وات بیشتر باشد و در غیر این صورت ماژول ترموالکتریک ژنراتور آسیب خواهد دید. شیائو و همکاران [۲۴] از ماژول چند مرحله ای با دو لایه اسکوترتید در بالای ماژول بیسموت-تلورید قرار داد و تابش خورشید متمرکز به عنوان منبع گرما استفاده کرد. ثابت شد که وقتی یک ماژول ۳ مرحله ای کار می کرد، بازده دو برابر می شود. اخیراً، یک سیستم یکپارچه ژنراتور-کولر توسط چن و همکاران ارائه شده است. [۲۵] در سیستم یکپارچه خود، کولرها توسط ترموالکتریک ژنراتور هدایت می شدند به طوری که هیچ منبع انرژی الکتریکی اضافی برای ترموالکتریک کولر ها لازم نیست. آنها نسبتهای بهینه ای بین ترموالکتریک ژنراتور ها و کولر ها را در شرایط عملیاتی مختلف از طریق تجزیه و تحلیل تحلیلی ارائه می دهند. موراس و همکاران [۲۶] در پروژه ای به عملکرد یک ژنراتور ترموالکتریک خورشیدی را تحت سرعت های مختلف باد پرداختند و عملکرد بالاتری را برای سیستم در سرعت باد کم گزارش داده اند. جدا از آنچه در بالا ذکر شد، تحقیقات دیگری نیز وجود دارد که جنبه های مختلفی از ماژول های حرارتی را گزارش می کند [۲۷، ۲۸، ۲۹]. و در ادامه یک سیستم ترموالکتریک ژنراتور با کمک جذب کننده انتخابی توسط دونگ جیانگ و همکاران ارائه شده است [۳۰]. در بررسی آنها افزایش دما بازده ولتاژ مدار باز را افزایش داده که این نتایج بر اساس یک سیستم ترموالکتریک کولر به دست آمد و اگر یک مولد

ترموالکتریک ژنراتور مبنی بر اکسید تحت غلظت های مختلف خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. برای افزایش جذب انرژی توسط ترموالکتریک ژنراتور، یک صفحه گرافیتی چسبنده به سطح ترموالکتریک ژنراتور وصل شد و در هر دو سیستم ترموالکتریک ژنراتور، تغییر دما در قسمت های گرم و سرد، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه به دست آمده و مقایسه می شود. نتایج آنها حاکی از تأثیر معنی دار استفاده از ورق گرافیت در سیستم ترموالکتریک ژنراتور بر تولید برق است. در یک پژوهش دیگر، شوگنسی و همکاران [۱۶] ژنراتور ترموالکتریک را با اجاق گاز پخت و پز ادغام کردند و در آن واحدهای ژنراتور عملاً در روستایی در مالای مستقر شده اند که این امکان را برای کاربر فراهم می کند که چراغ های ال ای دی را شارژ کند. در تحقیقی وو و همکاران [۱۷] با یک منبع گرمای زباله گرم که مستقیماً به یک ژنراتور ترموالکتریک داده می شود، تجزیه و تحلیل نظری انجام دادند. چامپیر و همکاران [۱۸] نتیجه گرفتند که توان خروجی ماژول ترموالکتریک عمدتاً به فشار اعمال شده بر روی ماژول های متصل به سری بستگی دارد. در کاربردهای مولد ترموالکتریک خورشیدی در سیستم های میکرو نیرو توسط آماتیا و رام مورد بررسی قرار گرفته شد [۱۹]. نتایج آنها نشان داد که راندمان و توان خروجی سیستم آنها به ترتیب ۳٪ و ۱،۸ وات بود. گو و همکاران [۲۰] از ۱۰ ماژول پلتیر به هم متصل شده دریافتند که قدرت خروجی به دست آمده حتی برای رانندگی فن محوری که برای اهداف خنک کننده استفاده می شود، کافی نبوده اما می تواند موثر باشد. در ادامه کینسلا و همکاران [۲۱] برای تولید مقادیر کمی الکتریسیته تولیدی با ژنراتور الکتریکی با استفاده از فناوری ترموالکتریک نتیجه گرفته اند که اختلاف دما هرچه بیشتر باشد، توان خروجی به دست آمده بیشتر است. توسعه، تجزیه و تحلیل و ارزیابی سیستم چندتایی مبتنی بر انرژی خورشیدی با ژنراتور حرارتی توسط شهید اسلام و همکاران بررسی شده است [۲۲]. آنها یک سیستم چند نسل یکپارچه مبنی بر انرژی خورشیدی را با دو تنظیم منحصر به فرد از ژنراتورهای حرارتی تجزیه و تحلیل کردند. سیستم اول یکپارچه سازی خروجی ژنراتورهای حرارتی

جزئیات ترموالکتریک ژنراتور استفاده شده در جدول ۱ و شکل ۱ نشان شده است.



شکل ۱ ترموالکتریک ژنراتور استفاده شده در سیستم بازیافت

جدول ۱ مشخصات ترموالکتریک ژنراتور

پارامترها	اندازه قلم
ماکزیمم دمای سمت گرم	۳۰۰ درجه سانتی گراد
دمای سمت سرد	۳۰ درجه سانتی گراد
ماکزیمم ولتاژ مدار باز	۸/۴ ولت
ماکزیمم توان خروجی	۱۴/۶ وات
ماکزیمم جریان خروجی	۳/۴ آمپر

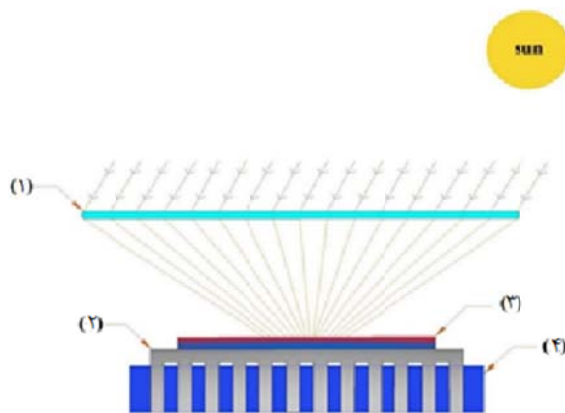
بخش دوم سیستم بازیافت، لنز یا عدسی محدب تاشو با چند مفصل در بدنه با شعاع ۶۰ میلی متر و بزرگنمایی ۲ ایکس می باشد که توانایی تغییر زاویه ها را در بدنه داشته و می توان ارتفاع و موقعیت لنزها را تنظیم نمود. لنز محدب یک لنز همگرا است که وقتی پرتو های موازی خورشید از این لنز عبور می کنند، در یک نقطه به نام نقطه کانونی همگرا می شوند و نقطه کانونی یک لنز محدب جایی است که اشعه های خورشید در آن نقطه به هم نزدیکتر می شوند [۳۳-۳۳]. از لنز محدب در سیستم بازیافت برای افزایش شار حرارتی در سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور و افزایش اختلاف دمای بیشتر بین دو طرف

ترموالکتریک بزرگتر استفاده شود، انتظار می رود که این مقدار بیشتر شود.

در این مقاله، از ترموالکتریک ژنراتور برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در یکی از ماه های گرم سال با استفاده از جابجایی طبیعی استفاده شده است، بنابراین برای تبدیل انرژی خورشید به انرژی الکتریکی که پر مصرف ترین انرژی در کشورهای صنعتی به شمار می رود، سیستمی طراحی شده که از سه بخش اصلی تشکیل شده است. یک ژنراتور ترموالکتریک، یک عدسی محدب و یک هیتسینک حرارتی از جنس آلومینیوم که یک سمت ترموالکتریک ژنراتور توسط انرژی خورشیدی و لنز محدب گرم می شود و طرف دیگر ترموالکتریک توسط هیتسینک حرارتی و آب جاری در یک رودخانه خنک می شود، بنابراین اختلاف دمای موجود در دو سمت ترموالکتریک ژنراتور، تولید ولتاژ الکتریکی را به همراه خواهد داشت. هدف از ارائه این روش، دستیابی به اختلاف دمای بیشتر در دو طرف ترموالکتریک در راستای تولید ولتاژ و توان الکتریکی با استفاده از دماهای موجود در محیط و بدون استفاده از قطعات الکترونیکی است.

۲- سیستم بازیافت انرژی خورشیدی

در این بخش از مقاله، طراحی فیزیکی و ساخت دستگاه بازیافت انرژی خورشیدی برای تولید ولتاژ الکتریکی تشریح داده شده است. سیستم ارائه شده در سه بخش اصلی شامل یک ترموالکتریک ژنراتور، یک عدسی (لنز) محدب و یک هیتسینک حرارتی آلومینیومی می باشد. ترموالکتریک استفاده شده در مدار بازیافت انرژی خورشیدی، قسمت اصلی سیستم بازیافت بوده و هنگامی که اختلاف دما بین دو طرف ترموالکتریک ژنراتور پدیدار می شود، ولتاژ و توان الکتریکی تولید می شود. ترموالکتریک استفاده شده در سیستم بازیافت از نوع TEG1-12611-6.0 با ابعاد ۵۶ میلی متر طول، ۵۶ میلی متر عرض و ۳/۶ میلی متر ارتفاع که دارای ۱۲۶ عدد نیمه هادی موازی و به عنوان یک ماژول ژنراتور در کاربردهای تجاری استفاده می شود.



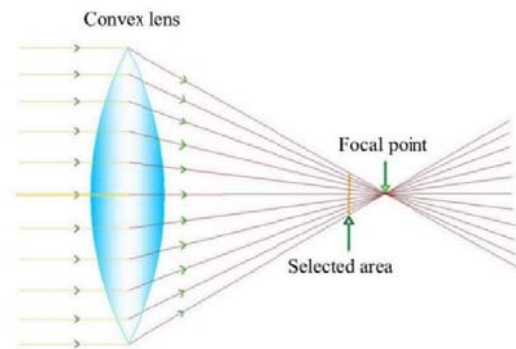
شکل ۳ نمایش شماتیک از سیستم بازیافت انرژی (۱) عدسی محدب (۲) هیتسینک آلومینیومی (۳) ترموالکتریک ژنراتور (۴) جریان آب

۳- مدل سازی سیستم بازیافت و روابط حاکم

در سیستم موجود اختلاف دمای بین دو طرف ترموالکتریک ژنراتور بخش اصلی طراحی این مدار است. این اختلاف دما بین گرمای ورودی و خروجی، باعث ایجاد ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه می شود که عواملی مانند شدت انرژی خورشیدی، دمای محیط، دمای آب و مقاومت حرارتی هیتسینک در مقدار آنها تاثیرگذار می باشند. به منظور به دست آوردن نتایج مطلوب و صحت از آنها، سیستم بازیافت انرژی حرارتی با استفاده از نرم افزار حلگر معادلات مهندسی به صورت کد مدل شده است و در انتها نتایج بدست آمده با نتیجه آزمایش های تجربی مقایسه می شوند. شکل ۴ نمایش کلی از یک ترموالکتریک ژنراتور را نشان می دهد. فرضیات زیر در روش مدل سازی در نظر گرفته شده است:

- (۱) دمای آب رودخانه در هر نقطه ثابت فرض شده است.
- (۲) دمای سمت سرد ترموالکتریک ژنراتور برابر با دمای بخش با پره هیتسینک برابر است.
- (۳) آب رودخانه فقط پره های هیتسینک را پوشش می دهد.
- (۴) سرعت آب در هر نقطه از آزمایش ثابت است.

ترموالکتریک ژنراتور استفاده شده است که در این آزمایش پرتوهای خورشیدی در ناحیه ای قبل از نقطه تلاقی پرتوها (فاصله کانونی) بر روی سطح گرم ترموالکتریک به شکل یک دایره با شعاع ۲۰ میلی متر جمع شده و سطح گرم را پوشش می دهند. شکل ۲ نمایش شماتیک از لنز محدب، ناحیه انتخاب شده و عملکرد آن را نشان می دهد، دلیل اصلی استفاده از لنز محدب در سیستم بازیافت، افزایش شار حرارتی در راستای افزایش دما در سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور با متمرکز نمودن پرتوهای خورشید است.



شکل ۲ نمایش شماتیک از عدسی محدب در جهت همگرا نمودن پرتوهای خورشید

آخرین بخش اصلی از سیستم بازیافت، هیتسینک حرارتی آلومینیومی است که قسمت سرد ترموالکتریک ژنراتور را با ابعاد طول ۶۶ میلی متر، عرض ۶۶ میلی متر و ارتفاع ۲۱ میلی متر را در بر می گیرد، که از ۹ عدد پره با ضخامت ۲ میلی متر با فاصله ۶ میلی متر بین پره ها انتخاب شده است. شکل ۳ نمایش شماتیک از سیستم بازیافت انرژی خورشیدی را نشان می دهد که مطابق شکل ۳ قسمت گرم ترموالکتریک ژنراتور توسط پرتوهای خورشید پس از عبور از عدسی محدب و قسمت سرد ترموالکتریک ژنراتور توسط هیتسینک حرارتی و آب جاری در یک رودخانه خنک می شود که این موهم بازیافت انرژی خورشیدی را به همراه دارد.

$$K_{TEG} = \frac{(T_H - \Delta T_{max}) \cdot V_{max} \cdot I_{max}}{2 \cdot T_h \cdot \Delta T_{max}} \quad (4)$$

$$R_{TEG} = \frac{(T_H - \Delta T_{max}) \cdot V_{max}}{T_h \cdot I_{max}} \quad (5)$$

$$\alpha_{TEG} = \frac{V_{oc}}{\Delta T_{max}} \quad (6)$$

روابط بالا مربوط به ویژگی های ترموالکتریک بوده و با توجه به دیتاشیت دستگاه محاسبه می شوند. در ادامه روابط ترموالکتریک شار حرارتی ورودی و خروجی از ترموالکتریک و همچنین مقاومت های حرارتی موجود در ترموالکتریک از روابط ۶ و ۷ بدست خواهند آمد. شکل ۵ مقاومت های موجود در مسیر انتقال گرما که در این پروژه به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است را نشان میدهد، شار حرارتی خروجی از سطوح سرد ترموالکتریک برابر با شار حرارتی وارد شده به هیتسینک حرارتی می باشد، بنابراین [۳۷،۳۸]:

$$Q_H = \frac{T_s - T_H}{R_h} \quad (7)$$

$$Q_{heat\ sink} = \frac{T_c - T_{water}}{R_c} \quad (8)$$

همچنین ولتاژ مدار باز، توان الکتریکی، جریان و بازده خروجی از سیستم بازیافت از روابط زیر بدست خواهند آمد:

$$V_{oc} = \alpha_{TEG} \cdot \Delta T - I \cdot R_{TEG} \quad (9)$$

در مدار باز جریان برابر صفر بوده پس خواهیم داشت:

$$V_{oc} = \alpha_{TEG} \Delta T \quad (10)$$

$$I = \frac{\alpha_{TEG} \cdot \Delta T}{R_{TEG} + R_{Load}} \quad (11)$$

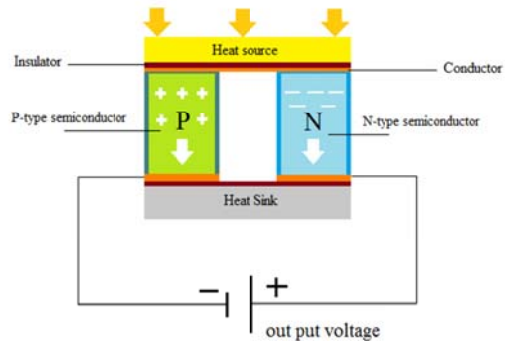
$$P_{SETUP} = Q_H - Q_C \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{P_{SETUP}}{Q_H} \times 100 \quad (13)$$

(۵) درجه حرارت در هر نقطه از قسمت گرم ترموالکتریک ژنراتور برابر است.

(۶) شار گرمای خروجی از سمت سرد ترموالکتریک ژنراتور با شار حرارتی ورودی به هیتسینک حرارتی برابر می باشد.

(۷) انتقال حرارت فقط در راستای X می باشد.



شکل ۴ نمایی شماتیک از فناوری ترموالکتریک ژنراتور

در روابط ترموالکتریک، مهم ترین پارامتر اختلاف دمای دو سمت سطوح سرد و گرم مدول های ترموالکتریک می باشد. گرادین دما بین دو سمت مدول های ترموالکتریک از رابطه ۱ محاسبه خواهد شد. همچنین مقدار شار حرارتی ورودی به سطوح گرم و مقدار شار حرارتی خروجی از سطوح سرد بر اساس روابط ۲ و ۳ بدست خواهد آمد [۳۴،۳۵].

$$\Delta T = T_H - T_C \quad (1)$$

$$Q_H = \alpha_{TEG} \cdot I \cdot T_H - 0.5 \cdot R_{TEG} \cdot I^2 + K_{TEG} \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$Q_C = \alpha_{TEG} \cdot I \cdot T_C + 0.5 \cdot R_{TEG} \cdot I^2 + K_{TEG} \cdot \Delta T \quad (3)$$

که در روابط ۲ و ۳ خصوصیت های ترموالکتریک شامل ضریب سیبک، مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی که مربوط به ترموالکتریک ژنراتور می باشد از روابط ۴ و ۵ و ۶ محاسبه خواهند شد [۳۶].

$$R_{th,f} = \frac{1}{h \cdot (A_b + A_f \cdot \zeta_f \cdot N_f)} \quad (14)$$

$$A_b = b \cdot L \cdot (N_f - 1) \quad (15)$$

$$A_f = 2 \cdot h_f \cdot L + 2 \cdot h_f \cdot t_f + t_f \cdot L \quad (16)$$

$$\zeta_f = \frac{\tanh(m \cdot h_f)}{(m \cdot h_f)} \quad (17)$$

$$m = \sqrt{\frac{P \cdot h}{A \cdot k_f}} \quad (18)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k_{water}}{S} \quad (19)$$

در رابطه ۱۹ ضریب همرفت بین صفحات موازی با استفاده از عدد بی بعد ناسلت و ضریب هدایت حرارتی آب رودخانه بدست می آید که در آن S مساحت سطح خیس از هیتسینک حرارتی می باشد [۴۲].

$$S = A_f \cdot N_f + L \cdot t_f \cdot N_f + A_b \quad (20)$$

$$Nu = \left\{ \frac{576}{\left(\frac{Ra \cdot \sqrt{S}}{L}\right)^2} + \frac{2.873}{\left(\frac{Ra \cdot \sqrt{S}}{L}\right)^{\frac{1}{2}}} \right\}^{-0.5} \quad (21)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_b - T_{water}) \cdot S^{\frac{3}{2}}}{\mu^2} \cdot Pr \quad (22)$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K_{water}} \quad (23)$$

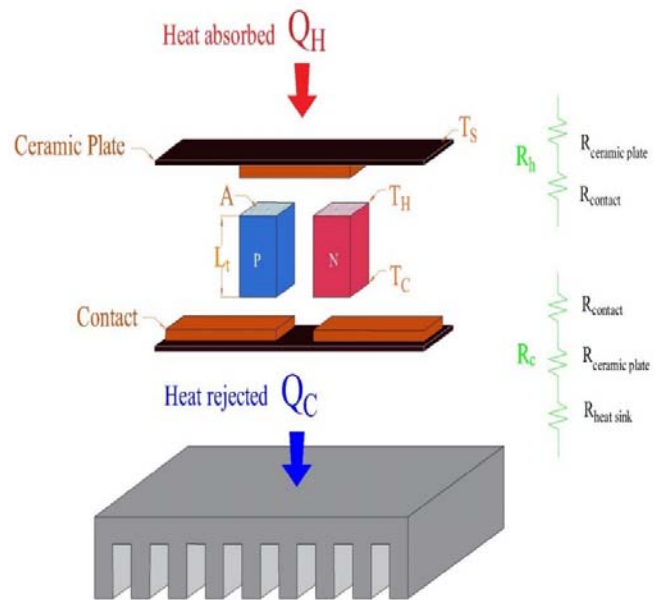
$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (24)$$

$$T_f = \frac{T_{water} + T_b}{2} \quad (25)$$

$$R_{th,heat\ sink} = R_{th,f} + \frac{H - h_f}{k_f \cdot w \cdot L} - \frac{t_{cnc}}{k_f \cdot A_{cnc}} \quad (26)$$

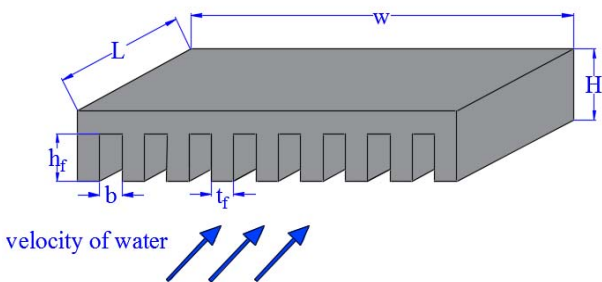
۳-۱- تحلیل عدم اطمینان

عدم قطعیت اندازه گیری به معنی تردید در خصوص اعتبار نتیجه حاصل از آزمایش است، عدم قطعیت، اطلاعاتی درباره کیفیت اندازه گیری ارائه می دهند که در نتیجه فقط تخمینی از مقدار واقعی است. عدم قطعیت های مرتبط با داده های این



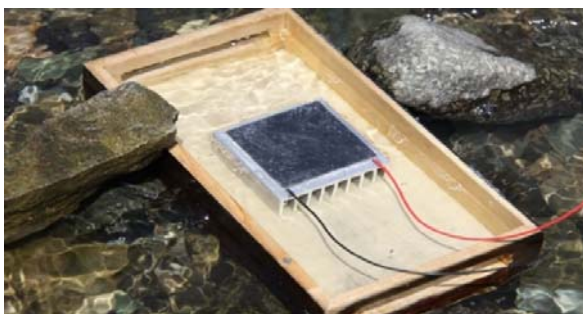
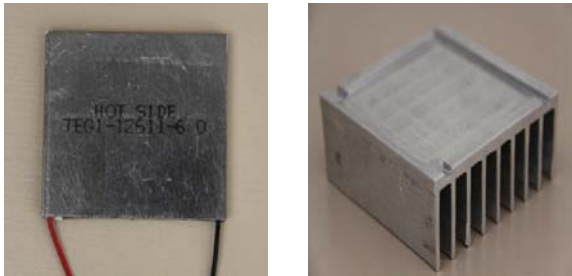
شکل ۵ ترموالکتریک ژنراتور و مقاومت های موجود در مدار

در سیستم بازیافت انرژی، هیتسینک حرارتی که بخش سرد را پوشش می دهد در مجاور رودخانه قرار گرفته است و تحت تاثیر آب جاری بوده بنابراین مکانیسم انتقال گرما، جابجایی طبیعی در نظر گرفته شده است. در این پروژه، هیتسینک گرمایی قسمت سرد ترموالکتریک ژنراتور را در بر می گیرد و تمام پره های آن آب را به صورت همرفت طبیعی تحت پوشش قرار می دهد، شکل ۶ این موضوع را نشان می دهد پس بنابراین مقاومت حرارتی هیتسینک حرارتی در جابجایی طبیعی و در ارتباط با آب به شرح زیر تخمین زده می شود [۳۹،۴۰،۴۱]:



شکل ۶ هیتسینک حرارتی در تماس با آب

سبب کاهش مقاومت حرارتی در بخش سرد ترموالکتریک ژنراتور می شود. شکل ۷ جعبه چوبی و بخشی از سیستم بازیافت انرژی خورشید را نشان می دهد که آب رودخانه توسط شیارهای که در سمت چپ و راست جعبه در نظر گرفته شده اند وارد جعبه می شود.



شکل ۷ جعبه چوبی در رودخانه در راستای قرار دادن بخشی از سیستم بازیافت

آخرین قسمت اصلی سیستم بازیافت انرژی، عدسی یا لنز محدب است و پس از قرار دادن عدسی محدب در مقابل مسیر پرتوهای

پروژه از نوع عدم قطعیت ب خواهند بود. و با استفاده از رابطه ۲۷ قابل محاسبه می باشد [۴۳-۴۵]:

$$U = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (27)$$

در رابطه ۲۷، a نشان دهنده دقت دستگاه اندازه گیری و U آنالیز عدم قطعیت استاندارد می باشد، جدول ۲ عدم قطعیت های مربوط به امکانات آزمایشگاهی را نشان می دهد.

جدول ۲ عدم قطعیت های استاندارد مرتبط با دستگاه های اندازه گیری

نوع دستگاه	دقت	بازه مشخص	عدم قطعیت استاندارد
سنسور دما نوع K	۰/۱ سانتی گراد	درجه سانتی گراد	۰/۰۶ سانتی گراد
مولتی متر	۰/۱ ولت	۰ - ۲۰ ولت	۰/۰۶ ولت
سنسور دما نوع L	۰/۱ سانتی گراد	درجه سانتی گراد	۰/۰۶ سانتی گراد

۴- آزمایش های عملی با استفاده از سیستم بازیافت انرژی

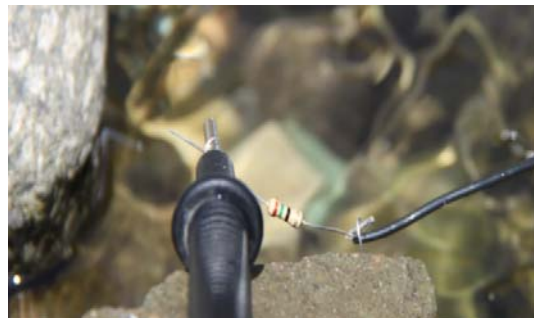
آزمایش های تجربی در رودخانه کن در شمال غربی شهر تهران (۳۴,۴۷۵,۰,۶" ۵۱,۱۵۰,۶,۶") انجام شده است، این رودخانه از غرب کوه توچال جاری شده و از پایین دست به سمت روستای کن و کلانشهر تهران حرکت می کند. در حین انجام آزمایش های عملی یک جعبه چوبی به سیستم بازیافت اضافه شده و در کنار رودخانه با ابعاد ۲۳۰ میلی متر طول، ۱۱۰ میلی متر عرض، ۳۷ میلی متر عمق و ۹۰ گرم وزن قرار داده شده است. جعبه چوبی در راستای هدایت نمودن جریان آب به پره های هیتسینک و کاهش دمای سطح سرد در حاشیه رودخانه تعبیه شده است. پس از قراردادن جعبه چوبی، سیستم بازیافت در داخل جعبه قرار گرفته و آب روان رودخانه از داخل مجموعه عبور کرده و پره های هیتسینک آلومینیومی را پوشش می دهد و



شکل ۸ نمایی متفاوت از سیستم بازیافت ساخته شده

شکل ۸ نشان می دهد وقتی پرتوهای موازی نور خورشید از لنز محدب عبور می کنند به پرتوهای همگرا تبدیل می شوند و سطح گرم ترموالکتریک ژنراتور را به شکل دایره ای پوشش می دهند، در نتیجه، سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور اشعه خورشید بیشتری را جذب می کند بنابراین دما در سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور افزایش می یابد و طرف دیگر ترموالکتریک ژنراتور توسط هیتسینک حرارتی آلومینیومی خنک می شود، این امر گرادیان دما در دو سمت ترموالکتریک ایجاد می نماید. آزمایش های انجام شده با استفاده از سیستم بازیافت پیش از ظهر شروع شده و تا سه ساعت ادامه می یابد و با گذشت زمان هیتسینک آلومینیومی که تحت تابش پرتوهای خورشید می باشد و رسیدن به شرایط پایدار گرم می شود که از این قبل از انجام آزمایش های عملی با استفاده سیستم بازیافت، یک ورق آلومینیومی نازک (فویل) با فاصله نسبتاً کم به هیتسینک آلومینیومی به مدار اضافه شده و مانع از گرم شدن هیتسینک حرارتی توسط پرتوهای خورشید در شرایط پایدار می شود. آزمایش های انجام شده در روز تابستان (۲۳ اوت ۲۰۱۹) در شرایط آب و هوایی یافت شده در تهران انجام شده است. آزمایشات که از ساعت ۱۱:۳۰ صبح شروع شده و در ساعت

خورشید، ناحیه ای از پرتوهای شکسته شده خورشید بر روی بخش گرم ترموالکتریک با قطر ۲۰ میل متری سبب افزایش شار حرارتی ورودی به ترموالکتریک می شود. شکل ۸ آزمایش های عملی را از نماهای متفاوت نشان می دهد.



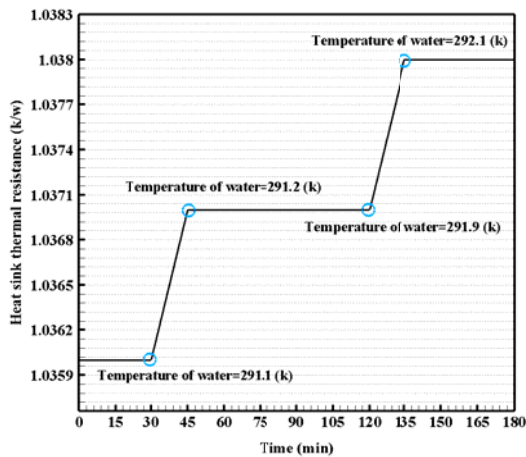
مختلف در طول آزمایش های عملی با لنز محدب و بدون لنز محدب نشان می دهد. مطابق شکل ۹، هنگامی که اختلاف دما دو طرف ترموالکتریک ژنراتور افزایش می یابد ولتاژ مدار باز افزایش می یابد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، در آزمایش های تجربی حداکثر گرادیان دما با لنز محدب و بدون لنز محدب در حالت پایدار به ترتیب ۲۵ درجه سانتی گراد و ۷/۸۸ درجه سانتی گراد می رسد. در این شرایط دمایی آب رودخانه ۲۹/۱۵ کلوین و مقاومت حرارتی هیتسینک حرارتی ۱/۰۳۷ کیلو بر وات گزارش شده است.

در آزمایش های انجام شده، دمای سطح در قسمت گرم ترموالکتریک ژنراتور به انرژی خورشید، لنز محدب و وضعیت لنز محدب وابسته بوده و مطابق شکل ۱۰ هنگامی که لنز محدب به سیستم اضافه می شود، شار حرارتی در سمت گرم افزایش می یابد و بنابراین دمای سطح در سراسر سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور نیز افزایش می یابد. در آزمایش های عملی هر ۱۵ دقیقه مقادیر ولتاژ تولید شده، جریان، دمای آب رودخانه، دمای سطح و دمای محیط اندازه گیری شده اند. شکل ۱۰ تغییرات مقاومت حرارتی با گذشت زمان را نشان می دهد که وابسته به دمای آب و محیط تحت آزمایش می باشد. همچنین دمای محیط از ۳۰۵ کلوین تا ۳۰۹ کلوین متغیر بوده و در طول آزمایش های عملی، افزایش دمای محیط سبب افزایش دمای سطح و دمای آب رودخانه می شود.

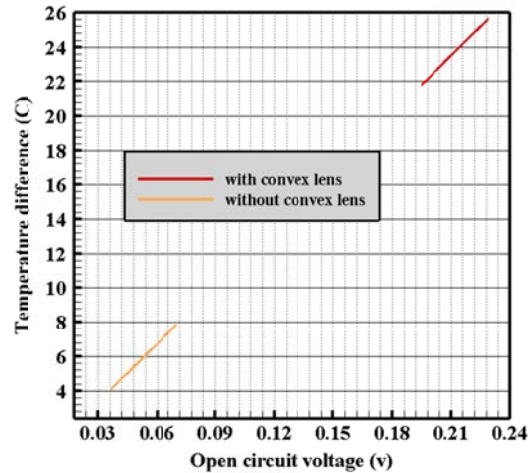
۲:۳۰ بعد از ظهر به پایان رسید و در طول آزمایش ها تمام داده های تجربی با فاصله ۱۵ دقیقه در حالت پایدار جمع آوری شده اند، علاوه بر این، وضعیت لنز محدب هر ۱۰ دقیقه یکبار بررسی و در صورت لزوم با دست جابجا شده تا بخش انتخاب شده درست در وسط قسمت گرم ترموالکتریک ژنراتور با قطر ۲۰ میلی متر به کار خود ادامه دهد. همچنین درجه حرارت در قسمت های مختلف مانند بخش گرم ترموالکتریک ژنراتور، دمای محیط و دمای آب توسط دماسنج های نوع K8006، دماسنج جیوه ای و دماسنج نوع LX8011 اندازه گیری شده و برای محاسبه ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه از ولت متر نوع DT9205A استفاده شده است.

۵- نتایج

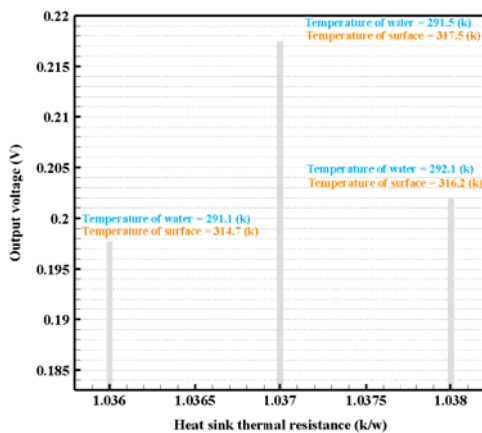
این مقاله در مورد طراحی و آزمایش یک سیستم بازیافت انرژی خورشیدی توسط پدیده های فیزیکی به مانند ترموالکتریک ارائه شده است. هدف اصلی در این مقاله، بازیافت انرژی خورشیدی با استفاده از فناوری ترموالکتریک به انرژی الکتریکی است. سیستم ساخته شده از سه بخش اصلی شامل یک ترموالکتریک ژنراتور، یک لنز محدب و یک هیتسینک حرارتی از جنس آلومینیوم تشکیل شده است. نتایج به دست آمده در حالت پایدار نشان می دهد که میزان توان تولید شده به اختلاف دما بین دو طرف ترموالکتریک ژنراتور وابسته می باشد، بنابراین طبق آزمایشات تجربی در روز تابستان (۲۳ اوت ۲۰۱۹) که از ساعت ۱۱:۳۰ شروع و تا ساعت ۱۴:۳۰ به مدت سه ساعت ادامه داشته است. براساس گزارش های بدست آمده از نتایج آزمایش های عملی، مهمترین پارامتر برای افزایش راندمان خروجی از سیستم بازیافت، گرادیان دما بین دو طرف ترموالکتریک ژنراتور است که در این پروژه یک عدسی محدب به مدار بازیافت اضافه شده که سبب همگرا شدن پرتوهای خورشید در قسمت گرم ترموالکتریک ژنراتور می شود و دایره ای با قطر ۲۰ میلی متر بوجود می آورد که در نتیجه باعث افزایش دما در سمت گرم ترموالکتریک ژنراتور و افزایش گرادیان دما می شود. شکل ۹ تغییرات ولتاژ مدار باز را برای شیب درجه حرارت



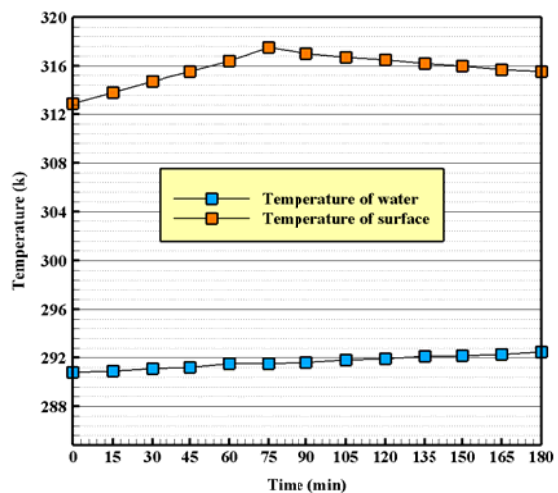
شکل ۱۱ تغییرات دمای آب و مقاومت حرارتی هیتسینک با زمان



شکل ۹ تغییرات ولتاژ مدار باز خروجی برای شیب های مختلف دما



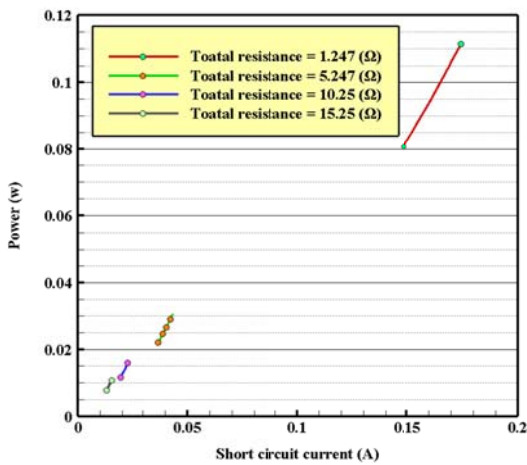
شکل ۱۲ تغییرات مقاومت حرارتی هیتسینک و ولتاژ مدار باز



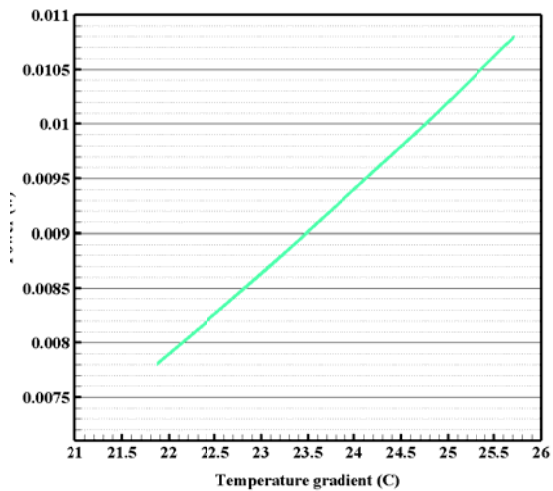
شکل ۱۰ تغییرات دمای سطح و دمای آب با زمان

تغییرات گرادیان دما و تأثیر آن بر توان و بازده دستگاه در شکل های ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که حداکثر مقدار بازدهی سیستم بازیافت در ساعت ۱۲:۴۵ رخ می دهد که دمای آب ۲۹۱/۵ کلوین و دمای سطح گرم ترموالکتریک ۳۱۷/۵ کلوین می باشد که در این زمان توان خروجی در حدود ۰/۱۱۱۴ وات و راندمان سیستم ۶/۶۴۸٪ اندازه گیری شده است.

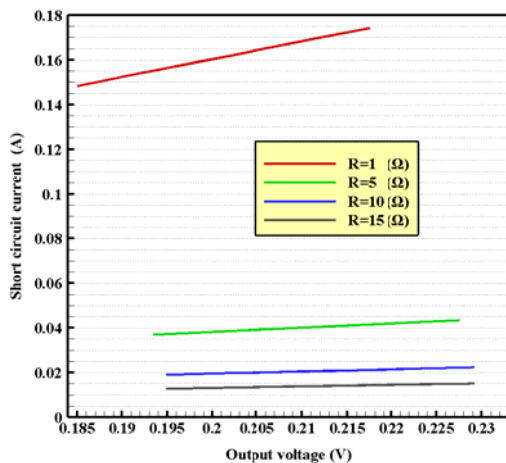
قسمت سرد ترموالکتریک ژنراتور که توسط بخش با پره هیتسینک حرارتی احاطه شده است در معرض آب رودخانه بوده پس بنابراین کاهش دمای آب رودخانه سبب کاهش مقاومت حرارتی هیتسینک می شود و هرچه مقاومت هیتسینک آلومینیومی کاهش یابد، ولتاژ تولید شده از ترموالکتریک به دلیل کاهش دمای سمت سرد ترموالکتریک، افزایش می یابد. شکل های ۱۱ و ۱۲ تغییرات ذکر شده را نشان می دهند.



شکل ۱۵ تغییرات توان و جریان با مقاومت های موجود



شکل ۱۳ تغییرات توان و گرادیان دما

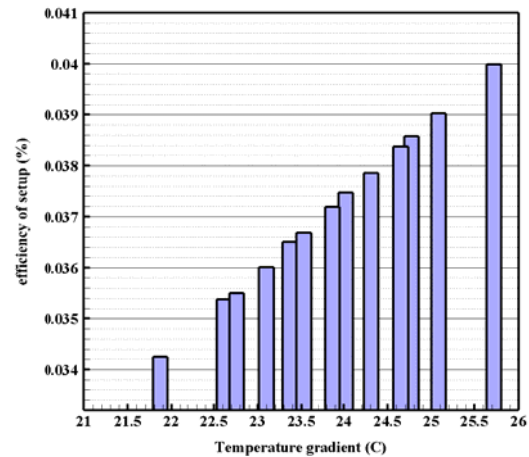


شکل ۱۶ تغییرات جریان و ولتاژ خروجی با استفاده از مقاومت های موجود در آزمایش های عملی انجام شده هر ۱۵ دقیقه مقادیر ولتاژ خروجی، جریان خروجی از دستگاه، دمای آب رودخانه و دمای سطح گرم ترموالکتریک اندازه گیری شده اند. جدول ۳ پارامترهای اندازه گیری شده را در ۲۳ اوت ۲۰۱۹ را نشان می دهند.

۶- فهرست علائم

I جریان (A)

Pr عدد پراوتل



شکل ۱۴ تغییرات بازده خروجی از سیستم و گرادیان دما

برای محاسبه مقدار جریان خروجی از سیستم بازیافت در آزمایش های انجام شده، مقدار مقاومت های بار ۱ اهم، ۵ اهم، ۱۰ اهم و ۱۵ اهم به مدار الکتریکی سیستم سری شده و سپس جریان خروجی بر اساس شکل ۸ اندازه گیری شده اند و در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ تغییرات ولتاژ خروجی، قدرت و جریان ارائه شده است.

- [11] Niu Xing, Jianlin Yu, Wang Shuzhong. Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator. *J. Power Sources* 2009; 188:621-6.
- [12] Hsu C-T, Huang G-Y, Chu H-S, Yu B, Yao D-J. Experiments and simulations on low-temperature waste heat harvesting system. *Appl. Energy* 2011; 88:1291-7.
- [13] He Wei, Su Yuehong, Riffat SB, Hou JinXin, Ji Jie. Parametrical analysis of the design and performance of a solar heat pipe thermoelectric generator unit. *Appl. Energy* 2011; 88(12):5083-9.
- [14] Goldsmid HJ, Giutronich JE, Kaila MM. Solar thermoelectric generation using bismuth telluride alloys. *Sol Energy* 1980; 24(5):435-40.
- [15] Mahmoudinezhad S, Cotfas P, Cotfas D, Rezaia A, Rosendah L. Performance evaluation of a high-temperature thermoelectric generator under different solar concentrations. *Energy Procedia* 2018; 147: 624 - 30.
- [16] S.M.O"Shaugnessy, M.J.Deasy, C.E.Kinsella, J.V.Doyle, A.J.Robinson, "Small scale electricity generation from a portable biomass cookstove: prototype design and preliminary results", *Applied Energy*, vol. 102, pp. 374-385, 2012.
- [17] Chih Wu, "Analysis of Waste-heat thermoelectric power generators", *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, pp. 63-69, 1996.
- [18] D.Champier, J.P.Bedecarrats, M.Rivaletto, F.Strub, "Thermoelectric power generation from Biomass cook stoves", *Applied Energy*, vol. 35, pp. 935-942, 2009.
- [19] Amatya R, Ram RJ. Solar thermoelectric generator for micropower applications. *J Electron Mater* 2010; 39(9):1735-40.
- [20] Xiaolong Gou, Heng Xiao, Suwen Yang, "Modelling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system", *Applied Energy*, vol. 87, pp. 3131-3136, 2010.
- [21] C.E.Kinsella, S.M.O"Shaugnessy, M.J.Deasy, M.Duffy, A.J.Robinson, "Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module", *Applied Energy*, vol. 114, pp. 80-90, 2013.
- [22] Islam S, Dincer I, Yilbas B S. Development, analysis and assessment of solar energy-based multigeneration system with thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management* 2018; 156: 746-756.
- [23] Cheng-Ting Hsu, Gia-Yeh Huang, Hsu-Shen Chu, Ben Yu, Da-Jeng Yao, "An effective Seebeck co-efficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module", *Applied energy*, vol. 88, pp. 5173-5179, 2011.
- [24] J Xiao, T Yang, P Li, P Zhai, Q Zhang, "Thermal Design and Management for performance optimization of solar thermoelectric generator", *Applied Energy*, vol. 93, pp. 33-38, 2012.
- [25] Chen X, Lin B, Chen J. The parametric optimum design of a new combined system of semiconductor thermoelectric devices. *Appl Energy* 2006; 83:681-6.
- [26] Moraes FS, Santos LC, Alencar RN, Sempels ÉV, Sandoval V JC, Lesage FJ. Solar thermoelectric generator performance relative to air speed. *Energy Convers Manage* 2015; 99:326-33.
- [27] Özdemir AE, Köysal Y, Özbas E, Atalay T. The experimental design of solar heating thermoelectric
- عدد ناسلت Nu
عدد رینولدز Re
ولتاژ مدار باز (volt) V_{oc}
گرادیان دما (C) ΔT
توان خروجی (watt) P_{setup}
بازده الکتریکی سیستم ζ_e
ضریب سیبک (V/K) α_{TEG}
مقاومت الکتریکی (Ω) R_{TEG}
ضریب هدایت گرمایی (W/K) K_{TEG}
دمای آب رودخانه (K) T_{water}
دمای سطح گرم ترموالکتریک (K) T_s
مقاومت حرارتی کل هیتسینک (K/W) $R_{th,heat sink}$
دمای بدنه پره (K) T_b
ضریب هدایت حرارتی پره (W/K) k_f
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.k) C_p

۷- مراجع

- [1] Ali Ekber Ozdemir, Y Koysal, E Ozbas, T Atalay. The experimental design of solar heating thermoelectric generator with wind cooling chimney. *Energy Conversion and Management*. 2015; 98: 127-133.
- [2] Ammar Y, Joyce S, Norman R, Wang Y, Roskilly AP. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Appl Energy* 2012; 89(1):3-20.
- [3] He W, Zhang G, Zhang X, Ji J, Li G, Zhao X. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Appl Energy* 2015; 143:1-25.
- [4] Bierman MJ, Jin S. Potential applications of hierarchical branching nanowires in solar energy conversion. *Energy Environ Sci* 2009; 2:1050-9.
- [5] Y. Da, Y. Xuan, Q. Li. From light trapping to solar energy utilization: a novel photovoltaic-thermoelectric hybrid system to fully utilize solar spectrum. *Energy*, 95 (2016), pp. 200-210.
- [6] Hosenuzzaman, N.A. Rahim, J. Selvaraj, M. Hasanuzzaman, Malek ABMA, A. Nahar. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renew Sustain Energy Rev*, 41 (2015), pp. 284-297.
- [7] Djafar Z, Putra N, Koestoer RA. The utilization of heat pipe on cold surface of thermoelectric with low-temperature waste heat. *Appl. Mech. Mater.* 2013; 302:410-5.
- [8] Ammar Y, Joyce S, Norman R, Wang Y, Roskilly AP. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Appl Energy* 2012; 89 (1):3-20.
- [9] He W, Zhang G, Zhang X, Ji J, Li G, Zhao X. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Appl Energy* 2015; 143:1-25.
- [10] Riffat SB, Ma X., "Thermoelectrics: a review of present and potential applications", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 913-935, 2003.

- generator with wind cooling chimney. *Energy Convers Manage* 2015; 98:127-33.
- [28] Zhang Z, Li W, Kan J. Behavior of a thermoelectric power generation device based on solar irradiation and the earth's surface-air temperature difference. *Energy Convers Manage* 2015; 97:178-87.
- [29] Li G, Zhang G, He W, Ji J, Lv S, Chen X, Chen H. Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array. *Energy Convers Manage* 2016; 112:191-8.
- [30] Dongyue Jiang, ZengFan, MingDong, YanShang, XiaohuaLiu, GuijunChen, SufenLi. Titanium nitride selective absorber enhanced solar thermoelectric generator (SA-STEG). *Appl Energy* 2018; 141: 828-834.
- [31] Nakano, Y., Murata, K. *Appl Opt*, 24 (1985) 3162.
- [32] Bernardo, L.M., Soares, O.D.D. *Appl Opt*, 27 (1988) 296.
- [33] Sriram, K.V., Kothiyal, M.P., Sirohi, R.S. *Opt Luser Technol*, 23 (1991) 241.
- [34] Freedman SI. Thermoelectric power generation. In: Sutton GW, editor. *Direct Energy Conversion*. Mc-Graw-Hill; 1966. p. 141-76.
- [35] Suter C, Jovanovic Z, Steinfeld A. A 1 kWe thermoelectric stack for geothermal power generation - Modeling and geometrical optimization. *Appl Energy* 2012(99):379-85.
- [36] Meng F, Chen L, Sun F. A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multiirreversibilities. *Energy* 2011;36(5):3513- 22.
- [37] Huang HS, Weng YC, Chang YW, Chen SL, Ke MT. Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment. *Int Commun Heat Mass Transf* 2010;37(2):140-6.
- [38] Zhou Y. Energy harvesting using a thermoelectric generator and generic rule based energy management. For The Degree of Master of Science. Case Western Reserve University; 2008.
- [39] Bejan, A. and Sciubba, E., "The Optimum Spacing of Parallel Plates Cooled by Forced Convection," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 12, 1992, pp. 3259 - 3264.
- [40] Sparrow, E.M., "Analysis of Laminar Forced Convection Heat Transfer in Entrance Region of Flat Rectangular Ducts," *NACA Technical Note* 3331, 1955.
- [41] Flomerics Inc., 2 Mount Royal Ave., Marlborough, MA, 1999.
- [42] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th. ed., John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [43] Rahbar N, Esfahani JA. Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module. *Desalination* 2012; 284:55-61.
- [44] Rahbar N, Esfahani JA, Asadi A. An experimental investigation on productivity and performance of a new improved design portable asymmetrical solar still utilizing thermoelectric modules. *Energy Convers Manage* 2016; 118:55-62.
- [45] Esfahani JA, Rahbar N, Lavvaf M. Utilization of thermoelectric cooling in a portable active solar still - an experimental study on winter days. *Desalination* 2011; 269(1-3):198-205.