

بررسی عددی انتقال حرارت و تولید توان الکتریکی ترکیب مولدهای ترموالکتریک با مبدل هیبرید فتوولتائیک- ترموالکتریک در یک حفره جاذب خورشیدی

در این پژوهش مدل نوینی از سامانه ترکیبی ترموالکتریک- فتوولتائیک نصب شده در یک حفره مکعبی جاذب ارائه شده است. بررسی عملکرد سیستم هیبرید در شدت تابش‌ها و ضرایب انتقال حرارت مختلف خارج حفره نشان می‌دهد با اینکه میزان توان تولیدی سیستم پیشنهادی نسبت به ساختار حفره تمام هیبرید کمتر است اما نسبت به سیستم هیبرید فتوولتائیک- ترموالکتریک صفحه‌ای ۲ برابر می‌باشد. آنالیز انتقال حرارت حفره نشان می‌دهد بیشترین میزان تابش در سطح پایینی حفره اتفاق می‌افتد و لذا بهینه‌ترین محل نصب سیستم هیبرید در وجه پایینی حفره است. آنالیز اقتصادی انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد هزینه تولید انرژی این ساختار جدید نسبت به حفره تمام هیبرید ۴۰ درصد کمتر خواهد بود. از طرفی آنالیز انتقال حرارت نشان می‌دهد میزان بازتابش از دهانه حفره حدود ۸ درصد تابش ورودی است در حالیکه در صورت عدم استفاده از حفره این میزان حدود ۶۰ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد افزایش دو برابری ضریب انتقال حرارت همرفت خارج حفره، میزان توان تولیدی مولدهای ترموالکتریک جانبی از $114.8mW$ به $352.5mW$ در حدود سه برابر افزایش می‌یابد.

محمد عامری^۱

استاد

امید فرهنگیان مرندی^۲

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما : هیبرید فتوولتائیک-ترموالکتریک، حفره جاذب خورشیدی، انتقال حرارت تابشی، توان الکتریکی

۱- مقدمه

تولید خالص انرژی الکتریکی در سال (۲۰۱۲)، ۲۱٫۶ میلیارد مگاوات ساعت بوده است که طبق پیش‌بینی گزارش سال (۲۰۱۶) دورنمای بین‌المللی انرژی^۳ این مقدار در سال (۲۰۴۰) به ۳۶٫۵ میلیارد مگاوات ساعت افزایش خواهد یافت که نشان از رشد ۶۹٪ دارد [۱]. به بیانی دیگر امروزه مصرف انرژی بشر به بیش از ۴۳ تراوات ساعت رسیده است که بیش از ۸۷٪ از آن، به وسیله سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود [۲]. به منظور مواجه با رشد سریع تقاضای برق و جلوگیری از مسائل مخرب زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، تلاش‌های زیادی در توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر انجام شده است.

^۱ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران m_ameri@sbu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران o_farhangian@sbu.ac.ir

^۳ International Energy Outlook 2016

تولید انرژی الکتریکی خالص از منابع تجدیدپذیر در بازه زمانی سال‌های (۲۰۱۲) تا (۲۰۴۰) سالانه به طور میانگین ۲,۹٪ درصد رشد خواهد داشت [۱]. روش‌های تأمین برق از انرژی خورشیدی به طور کلی به ۲ دسته تقسیم می‌گردند [۳]. سامانه‌های حرارتی که انرژی حرارتی خورشید را به صورت غیر مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و سامانه‌های فتوولتائیک که در آن انرژی تابشی خورشید به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. سلولهای فتوولتائیک مبدل‌های با بازده بالا می‌باشند که تحت تاثیر حرارت و با بالا رفتن دمای کارکرد، بازده آنها افت می‌کند. یکی از روشهای کاهش افت توان ناشی از بالا رفتن دمای سلولها استفاده از سامانه ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی می‌باشد. در این سامانه گرمای هدر رفت سلول فتوولتائیک در مبدل حرارتی دیگر به عنوان منبع گرم استفاده می‌شود. یکی از مبدلهای نوین که قابلیت کاربرد در این سامانه ترکیبی را دارد مولد ترموالکتریک^۱ می‌باشد. مولد ترموالکتریک، نوعی موتور گرمایی فاقد قطعات متحرک بوده که در آن الکترون بعنوان سیال کاری عمل کرده و حرارت را به برق تبدیل می‌کند. این مولدها نسبت جرم به تولید قدرت کمتری از سایر روش‌های تولید انرژی دارند و چون فاقد قطعات متحرک هستند، قابلیت اطمینان بالا داشته و نیازمند تعمیر و نگهداری کمتری می‌باشند [۴].

چاوز و همکاران [۵] به امکان‌سنجی استفاده از مولدهای ترموالکتریک در سامانه‌های ترکیبی پرداختند. آن‌ها چهار نوع سیستم مختلف که همگی دارای ماژول‌های فتوولتائیک، مدول‌های ترموالکتریک و کانال استخراج‌کننده حرارت بود را در حالات همراه با متمرکزکننده نور و بدون متمرکزکننده نور بصورت تجربی ارزیابی کردند. مولدهای ترموالکتریک مورد مطالعه از نوع بیسموت تریلیوم بوده که برای اختلاف درجه حرارت ۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده بودند. طبق نتایج آن‌ها، بازده مولد ترموالکتریک بصورت خطی وابسته به اختلاف دمای صفحات سرد و گرم ترموالکتریک بوده و در اختلاف دمای ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد به حدود ۴٪ می‌رسد. همچنین توان تولیدی با توان ۲ اختلاف دمای در طرف ترموالکتریک رابطه مستقیم دارد. میکوویچ و همکاران [۶] در تحقیقی دیگر، مولد ترموالکتریک را با کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی برای تولید همزمان برق و حرارت تلفیق کرده‌اند. در این تحقیق یک بازتابنده سهموی پرتوهای خورشیدی را در کانون خود روی سطح حاوی مواد انتخابی به مولد ترموالکتریکی می‌تاباند و با ایجاد گرادیان دمایی بین دو سمت این ژنراتور، برق تولید می‌شود. در این تحقیق از یک سامانه ترموسیفونی به عنوان جاذب حرارت در بخش دیگر ژنراتور استفاده شده است که با کنترل دمای سطح سرد، حرارت دریافتی از آن را به سیکل زیرین جهت ذخیره‌سازی منتقل می‌کند.

در این مطالعه همچنین عملکرد سامانه به ازای جنس‌های مختلف ژنراتور ترموالکتریک شامل بیسموت تلوراید^۲ سرب تلوراید^۳ و سیلیکون ژرمانیم^۴ و نیز اثر مواد گوناگون برای سیال کاری سامانه و همچنین بدنه ترموسیفون^۵ بررسی شده است. حسن نیا و همکاران [۷] در مطالعه تجربی از مدولهای ترموالکتریک در مسیر انتقال گرما از سطح جاذب گرمای خورشید به انباره آب آبگرمکن خورشیدی استفاده کردند.

¹ Thermoelectric Generator

² Bi₃Te₃

³ PbTe

⁴ SiGe

⁵ Thermosyphone

همچنین برای متمرکز نمودن نور خورشید و رسیدن به دمای قابل توجه برای تولید برق به وسیله ترموالکتریک، از لنزهای فرزنل استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان می‌دهد که میزان ماکزیمم توان الکتریکی ترموالکتریک ۱,۰۸ وات تحت شدت تابش ۷۰۵,۹۸ وات بر مترمربع است و در این حالت راندمان گرمایی سیستم در حدود ۵۱,۵۸٪ درصد می‌باشد.

در سال (۲۰۱۲) دنگ و همکاران [۸] سامانه ترکیبی شامل سلول فتوولتائیک لایه نازک سیلیکونی، مولد ترموالکتریک و کلکتور حرارتی را ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. همچنین آنها توزیع شار گرمایی را به کمک روش‌های المان محدود برای مولد ترموالکتریک مدلسازی کردند. طبق کار آنها، خروجی‌های سلول فتوولتائیک و مولد ترموالکتریک به علت طراحی تلفیقی همزمان افزایش می‌یابد. مجموع توان تولیدی سیستم آنها ۳۹۳ میلی‌وات بوده که دو برابر توان تولیدی ناشی از سلول به تنهایی است.

در طراحی متفاوت، لی و همکاران [۹] در مقاله خود یک سامانه جدید خورشیدی تشکیل شده از سلول خورشیدی و مولد ترموالکتریک را معرفی کردند. این سیستم با بهره‌گیری از روش‌های موجود در جداکردن طول موج‌های خورشیدی، قادر به استفاده از طیف وسیعی از تابش خورشیدی است. در این طراحی، طول موج‌های کوتاه خورشید به سمت سلول خورشیدی و طول موج‌های بلند به سمت یک ژنراتور ترموالکتریک هدایت می‌شود که نتایج حاصل حاکی از دستیابی به راندمان کلی بالا است. در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف ترموالکتریک نیز پرداخته شده است. می‌توان گفت که هرچه گرادیان دمایی میان دو سمت ترموالکتریک بیشتر باشد، بازده زیادتر است. بر طبق نتایج این تحقیق، هرچه دمای سمت داغ ترموالکتریک بیشتر و دمای سمت سرد آن کمتر باشد، راندمان بیشتر است. ولی در مواقعی که ترموالکتریک به کار رفته دارای ضریب شایستگی^۱ بدون بعد کمتر باشد، اثر کاهش دمای سطح سرد روی افزایش راندمان بارزتر است. وجه تمایز این کار با تحقیقات قبلی این است که علاوه بر بکارگیری جداکننده طیفی، سلول خورشیدی و مدول ترموالکتریک به یکدیگر نچسبیده و در دو طرف بخش خنک‌کن قرار گرفته‌اند. لی و همکاران به این نتیجه رسیدند که چیدمان اجزا سیستم و بهینه‌سازی آنها، مهم‌ترین عوامل در افزایش بازده کلی سیستم است. لین و همکاران [۱۰] سامانه ترکیبی فتوولتائیک-ترموالکتریک را به کمک تحلیل دمای نقاط مختلف و توان خروجی تولیدی برای دو حالت ترکیبی و غیرترکیبی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای حل معادلات خود از روش نیوتون رافسون اصلاح شده استفاده کردند و مشاهده کردند سلول فتوولتائیک در حالت ترکیبی با ماژول ترموالکتریک نسبت به حالت تکی و تنها دارای دمای بالاتری بوده و همچنین این مهم که بازده سیستم ترکیبی نسبت به بازده سیستم فتوولتائیک پایین‌تر است.

ژانگ و همکاران [۱۱] مدلی عددی برای تحلیل سامانه ترکیبی فتوولتائیک-ترموالکتریک تحت تابش متمرکز را توسعه دادند. آنها انواع سلول‌های سیلیکون کریستالی، سلیکون لایه نازک و پلیمری را مطالعه کردند. تاثیر دما بر بازده سلول فتوولتائیک با توجه به معادلات نیمه‌رسانا بررسی شد و نتیجه بدین‌گونه بود که برای سامانه‌های ترکیبی متمرکز، سلول‌های سیلیکون لایه نازک پلی‌کریستالی و برای سامانه‌های بدون قابلیت تمرکز، سلول‌های پلیمری مناسب‌تر هستند.

¹ ZT

در تحقیقی دیگر که توسط پانگ و همکاران [۱۲] انجام شد، عملکرد حرارتی سامانه ترکیبی فتوولتائیک- ترموالکتریک بصورت تجربی و با استفاده از ماژول فتوولتائیک مونوکریستالی و لامپ ۱۰۰۰ وات هالوژن به عنوان منبع نور مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. طبق نتایج این تحقیق، استفاده از یک چاه حرارتی در پشت مدول ترموالکتریک به لحاظ حرارتی عملکرد سیستم را ارتقا می دهد.

وو و همکاران [۱۳] عملکرد سامانه ترکیبی فتوولتائیک- ترموالکتریک همراه با جریان نانوسیال بعنوان چاه حرارتی برای ماژول ترموالکتریک در دو حالت با وجود شیشه و بدون حضور شیشه را بصورت نظری تحلیل کردند. در ابتدا آن ها عملکرد را برای شیشه بررسی کردند و بدین گونه گزارش کردند که تحت شرایط ضریب شایستگی بالا، نسبت تمرکز بالا و پوشش شیشه ای با ضریب عبوردهی افزایش یافته، سامانه همراه با شیشه عملکرد بهتری دارد. همچنین تاثیر سرعت باد بعنوان عاملی مهم که اغلب در تحقیقات در نظر گرفته نمی شود و همچنین دبی جریان نانوسیال بر بازده کلی سیستم بررسی شد. همچنین طبق نتایج آن ها، هنگامی که بازده ترموالکتریک به بیشینه خود می رسد، مقدار بهینه مقاومت بار الکتریکی بزرگتر از مقدار متناظر آن با حداکثر بازده کلی می شود. افزون بر این، استفاده از نانوسیال با توجه به بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی، نتایج بهتری را در مقایسه با آب نشان می دهد.

در پژوهشی دیگر، نجفی و همکاران [۱۴] مدل مفهومی از انتقال حرارت در یک سامانه ترکیبی فتوولتائیک- ترموالکتریک- حرارتی^۱ را توسعه داده و تحلیل کردند. بدین منظور از نرم افزار متلب استفاده کردند. سامانه آن ها شامل ماژول فتوولتائیک، ورق نازک آلومینیومی، ماژول ترموالکتریک، پره های آلومینیومی جهت افزایش ضریب هدایت حرارت و کانال هوای خنک برای خنک کاری طرف سرد ترموالکتریک بود. این سامانه تحت شرایط تابش مختلف تحلیل شده و نتیجه آن تعیین تعداد بهینه ماژول های ترموالکتریک بود. همچنین توان کلی تولیدی سیستم ترکیبی تحت شرایط مختلف تابش و بازده هر کدام محاسبه شده است.

طبق نتایج آن ها، میزان تابش بالاتر منجر به اختلاف دمای بیشتر در دو سمت ترموالکتریک و لذا خروجی بیشتر ترموالکتریک می شود. با این حال، شدت تابش بیشتر منجر به افزایش دمای فتوولتائیک گردیده و بازده آن را کاهش می دهد. بنابراین بسته به سیستم خنک کاری موجود بایستی میزان تمرکز تابش انتخاب شود. نشان داده شده که تحت تابش ۲۸۰۰ وات بر متر مربع، سیستم ترکیبی با ۳۶ ماژول ترموالکتریک قابلیت تولید ۱۴۵ وات توسط پنل فتوولتائیک و ۴،۴ وات توسط ماژول های ترموالکتریک را دارد. بهبود مواد ترموالکتریک با بازده بالاتر و همچنین افزایش نسبت تمرکز تابش می تواند منجر به افزایش خروجی سیستم پیشنهادی گردد.

در تحقیقی دیگر، فیساک و همکاران [۱۵] عملکرد ماژول فتوولتائیک برای دو حالت مستقل و در ترکیب با مولدهای ترموالکتریک را بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش دمای ماژول های فتوولتائیک، بازده آن ها کاهش می یابد، لذا در این پژوهش از مولدهای ترموالکتریک به منظور استفاده بهینه از این افزایش دما و تولید توان بیشتر هر چند به مقدار کم استفاده شده است. برخلاف اکثر پژوهش های پیشین، نجفی و همکاران [۱۶] سامانه ای را پیشنهاد کردند که با استفاده از اثر پلتیر به خنک کاری ماژول فتوولتائیک می پردازد. توان مورد نیاز یخچال ترموالکتریک از خود ماژول های فتوولتائیک تامین می شود.

¹ PVT-TEG

بدین منظور مدلی با جزئیات کامل توسعه داده شده و به منظور تعیین دمای نقاط مختلف، محاسبه مقدار توان مورد نیاز ماژول‌های خنک‌کننده ترموالکتریک و توان اضافی تولیدی توسط سلول‌های فتوولتائیک، در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردید. اهداف این پژوهش ابتدا کنترل دمای فتوولتائیک در محدوده مناسب و سپس بهره‌گیری از بهینه‌سازی با روش الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین دقیق میزان جریان تامینی ترموالکتریک‌ها به نحوی که توان تولیدی کل سیستم در حالت بهینه باشد، بیان شده است. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده با مصرف مقدار منطقی انرژی الکتریکی توانسته است که دمای سلول خورشید را کاهش دهد. همچنین در صورت ارتقا مواد ترموالکتریک با درجات ضریب شایستگی بیشتر و همچنین سطوح بالاتر تابش، سیستم پیشنهادی عملکرد بهتری خواهد داشت.

بهینه‌سازی خنک‌کاری ترموالکتریک به هدف خنک‌کاری فعال در سلول خورشیدی توسط ورما و همکارانش [۱۷] انجام شد. در این تحقیق با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر مدول ترموالکتریک و با فرض اینکه خواص مواد به کار رفته در آن وابسته به دما هستند، عملکرد بهینه مدول ترموالکتریک با استفاده از روش حداکثر ردگیری پرتوهای خورشید مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثر دمای محیط و شدت‌های مختلف تابش خورشید در محیط نرم افزار متلب انجام شده است. نتیجه حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که برای شدت تابش در بازه ۰,۸-۱ کیلووات بر مترمربع و در دمای ۲۵ الی ۴۵ درجه سانتی‌گراد، راندمان الکتریکی سلول خورشیدی در حدود ۱,۸ درصد افزایش می‌یابد.

یکی از مهمترین چالش‌ها که در اکثر سامانه‌های ترکیبی ذکر شده وجود دارد میزان بازتابش نور خورشید از سطح سلول فتوولتائیک می‌باشد. با کاهش این بازتابش می‌توان انرژی الکتریکی بیشتری را استحصال نمود. نتایج تجربی حاصل از به کار گیری مدول‌های هیبرید فتوولتائیک-ترموالکتریک در حفره توسط فرهنگیان و همکاران [۱۸] نشان می‌دهد که با بکارگیری حفره بازده به میزان ۱۸,۹٪ نسبت به سیستمهای معمول افزایش می‌یابد اما از نظر اقتصادی هزینه تولید انرژی در حال حاضر بالاتر از سیستمهای معمول است. لذا در این پژوهش به منظور کاهش بازتابش از سطوح سلول فتوولتائیک سامانه ترکیبی، این سامانه در یک حفره جاذب بکار گرفته شده است. مدل پیشنهادی در این پژوهش از ترکیب ماژول فتوولتائیک-ترموالکتریک و مدول‌های ترموالکتریک درون یک مکعب بعنوان حفره جاذب خورشیدی تشکیل شده است بگونه‌ای که سامانه ترکیبی در وجه پایین این مکعب قرار می‌گیرند و به منظور جذب انرژی پرتوهای بازتاب شده از سطح سلول فتوولتائیک، مدول‌های ترموالکتریک در وجوه جانبی نصب شده‌اند.

پرتوهای بازتاب شده از سطح پایین دارای طول موج مناسب برای تولید در سلول‌های فتوولتائیک نبوده و بیشتر باعث گرمایش وجوه دیگر می‌شوند، بنابراین به منظور کاهش قیمت برق تولید شده، این سلولها از سطح جانبی حذف و فقط مدول‌های ترموالکتریک لحاظ شدند. از مزایای استفاده از حفره جاذب، کاهش اتلافات بازتابشی بواسطه افزایش ضریب جذب ظاهری سامانه مزبور است. هدف از این مطالعه، بررسی نظری تاثیر استفاده از حفره بر عملکرد سیستم ترکیبی فتوولتائیک-ترموالکتریک است. بدین منظور معادلات حاکم بر مسئله شامل انتقال حرارت و روابط مربوط به فتوولتائیک و ترموالکتریک به صورت عددی توسعه داده شده‌اند.

۲- مبانی مدلسازی سامانه ترکیبی فتوولتائیک- ترموالکتریک

سامانه مورد نظر مطابق شکل (۱) است. فرآیند تبادل حرارت بدین صورت است که پرتوهای نور بصورت دیفیوز و یکنواخت در همه جهات وارد حفره می‌شود. با برخورد پرتوها به سطوح داخلی جاذب که در واقع همان ماژول فتوولتائیک در سطح پایین و مولد ترموالکتریک در وجوه جانبی می‌باشد، تولید توان الکتریکی صورت گرفته و پس از پایدار شدن سامانه دمای صفحه گرم مولد ترموالکتریک و ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد. به منظور استفاده از این درجه حرارت و قابلیت حرارتی ایجاد شده، مولدهای ترموالکتریک چسبیده به پشت ماژول فتوولتائیک قادر خواهند بود تا تولید توان اضافی را داشته باشند. در این سامانه ترکیبی، هر سه نوع مکانیزم انتقال حرارت مشهود است. بدین صورت که انتقال حرارت درون حفره و بین وجوه مختلف آن از نوع تشعشعی است. همچنین در دیواره‌ها، انتقال حرارت بصورت هدایت بوده و با توجه به اینکه وجوه حفره جاذب از داخل و بیرون با هوا در تماس بوده، انتقال حرارت همرفت هم در این بین نقش دارد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه تابش وارده شامل طول موج‌های مختلف است، بنابراین همه آن قادر به تولید انرژی الکتریکی در فتوولتائیک نبوده و بخش مادون قرمز آن فقط موجب افزایش دمای فتوولتائیک‌ها می‌گردد. به عبارتی منبع گرم برای مدول‌های ترموالکتریک دمای افزایش یافته فتوولتائیک‌ها و منبع سرد آن محیط بیرون است.

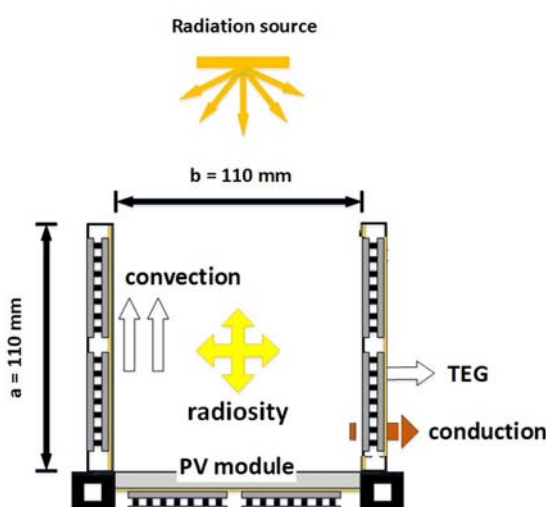
۲-۱- مدلسازی حرارتی سامانه ترکیبی

ابتدا فرضیاتی که در حل بکار رفته است، بیان می‌شود:

سامانه ترکیبی در شرایط پایا قرار داشته و تحلیل بر این مبنا انجام می‌شود.

- از اثرات طیفی و زاویه‌ای سطح ماژول فتوولتائیک صرف‌نظر می‌شود. به عبارتی قانون کیرشهف برقرار است. بنابر این قانون، ضریب جذب و ضریب گسیل برای یک سطح در دمای معین در هر

جهت و هر طول موج با هم برابر است: $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$



شکل ۱- شماتیک سیستم هیبرید فتوولتائیک-ترموالکتریک در حفره

- انتقال حرارت هدایت درون صفحه فتوولتائیک بصورت کاملاً یک بعدی به سمت خارج انجام می‌شود.
- توزیع دمای سطح ماژول فتوولتائیک بصورت کاملاً یکنواخت است.
- سطح ماژول فتوولتائیک به صورت دیفیوز عمل می‌کند. یعنی شدت گسیل از آن و شدت تابش ورودی به آن در همه جهات ثابت فرض می‌شود. همچنین خاکستری است یعنی خواص مستقل از طول موج هستند.
- با توجه به اینکه دمای هوای داخل حفره در محدوده نرمال قرار دارد، هوا در مکانیزم تابش غیرمشارکتی بوده و تنها تاثیر بسیار کمی در انتقال حرارت همرفت ایفا می‌کند.
- انتقال حرارت از صفحه گرم ترموالکتریک به صفحه سرد آن، فقط بواسطه هدایت از پایه‌های ترموالکتریک است. هیچ‌گونه انتقال حرارتی از صفحه گرم به صفحه سرد بواسطه تابش وجود ندارد.
- با توجه به نزدیک بودن دمای پایه‌های مولد ترموالکتریک به دمای صفحات سرد و گرم، هیچ‌گونه انتقال حرارتی بواسطه تابش از پایه‌ها به هر کدام از صفحات سرد و گرم وجود ندارد.
- ماژول فتوولتائیک بصورت ساده فرض می‌شود. یعنی از لایه‌های ضد غبار و ضد بازتاب روی ماده نیمه‌رسانای ماژول فتوولتائیک در صورت وجود، صرفه‌نظر می‌شود.
- ضریب عبور سلول، صفر در نظر گرفته می‌شود. یعنی ماژول فتوولتائیک از لحاظ خواص تابشی کدر فرض می‌شوند.

۲-۱-۱- تحلیل انتقال حرارت تابشی درون حفره

با توجه به این که هوای داخل محفظه غیرمشارکتی بوده و همچنین سطوح داخلی حفره از نوع کدر (ضریب عبور صفر)، خاکستری (خواص مستقل از طول موج هستند) و دیفیوز (هم از لحاظ گسیل و هم از لحاظ بازتابش) فرض می‌شوند، شار خالص تابشی هر المان داخل حفره و توان تابشی ورودی به آن با استفاده از روش رادیوسیتی (تئوری محفظه) قابل محاسبه خواهد بود [۱۹].

هنگام تحلیل مسائل تشعشع با استفاده از این روش بایستی هندسه مسائل را به یک محفظه کاملاً بسته تبدیل کرد. هرچند که ممکن است بعضی سطوح وجود خارجی نداشته باشند و مجازی تلقی می‌شوند. این روش بر این فرض استوار است که برای سطوحی که دمای مشخص و ثابت دارند، چه مقدار شار بایستی به سطح داده و یا از آن گرفته شود تا آن سطح در همان دما باقی بماند. همچنین در سطوحی که مقادیر شار برای آن‌ها مشخص است، مقدار دمای آن سطح چه خواهد بود. تحلیل انتقال حرارت تابشی برای محفظه بسته که دارای سطوح کدر، خاکستری و دیفیوز هستند در ذیل شرح داده شده است. با در نظر گرفتن موازنه انرژی سطحی بر آن، به این سطح دو بردار وارده شده که یکی توان تابشی وارده^۱ به آن $(q_{i,k} A_k)$ و دومی مقدار توانی است که بایستی به آن سطح داده شود تا در تعادل باقی بماند (Q_k) و دمای آن ثابت بماند.

¹ irradiation

از طرف دیگر بردار خروجی از آن معادل تابش خروجی از سطح شامل بازتاب تابش وارده به آن و گسیل از خود سطح بوده که به رادیوسیتی^۱ $(q_{o,k} A_k)$ معروف است. معادلات مربوط به موازنه این سطح به صورت (۱) و (۲) هستند [۱۹]:

$$q_{o,k} = \epsilon_k e_{bk} + \rho_k q_{i,k} \quad (1)$$

$$Q_k = (q_{o,k} - q_{i,k}) \cdot A_k \quad (2)$$

ϵ_k ضریب گسیل، ρ_k ضریب بازتاب و A_k مساحت سطح k -ام هستند. با توجه به روابط انتقال حرارت تابشی و قرینه سازی معادلات ولتاژ- مقاومت الکتریکی، رابطه Q_k به صورت (۳) خواهد بود:

$$Q_k = \frac{e_{bk} - q_{o,k}}{\frac{1-\epsilon_k}{\epsilon_k A_k}} = \frac{\epsilon_k A_k}{1-\epsilon_k} (e_{bk} - q_{o,k}) \quad (3)$$

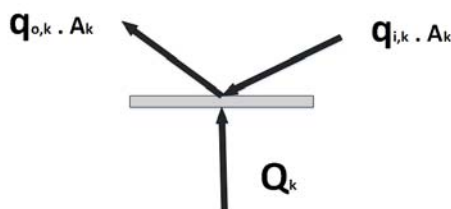
پس از ساده سازی خواهیم داشت:

$$\epsilon_k \cdot e_{bk} = \sum_{j=1}^N [\delta_{kj} - (1-\epsilon_k) \cdot F_{k-j}] \cdot q_{o,j} \quad (4)$$

بنابراین در محفظه برای سطوحی که دارای دمای معلوم باشند (شرط مرزی دما ثابت قابل استفاده باشد)، به کمک رابطه (۴) می توان مقدار دما را محاسبه کرد. از طرفی ممکن است در بعضی سطوح شار حرارتی ثابت باشد، که در این حالت با استفاده از رابطه (۲) و ساده سازی های مربوطه خواهیم داشت:

$$\frac{Q_k}{A_k} = \sum_{j=1}^N [\delta_{kj} - F_{k-j}] \cdot q_{o,j} \quad (5)$$

بایستی دقت کرد که حفره هیبرید دارای هر دو حالت فوق می باشد. بنابراین بایستی از ترکیب دو معادله (۴) و (۵) استفاده کرد. روش مذکور، فرمولاسیون غیرمستقیم روش تئوری محفظه نام دارد.



شکل ۲- موازنه انرژی سطحی برای سطحی داخلی حفره هیبرید که با محیط تبادل تابش دارد.

¹ radiosity

در ماتریس فوق، نمادهای F مربوط به ضریب دید بین وجوه مختلف حفره جاذب است که در این پژوهش با استفاده از روش مونت کارلو محاسبه شده است. در حالتی که همزمان تابش خارجی (همانند شار تابش خورشیدی و انتقال همرفت) به سطوح وارد شود، نیاز به تصحیح معادله (۵) به صورت معادله (۶) خواهد بود [۲۰]:

$$\frac{Q_k}{A_k} + q_{solar} - q_{convection} = \sum_{j=1}^N [\delta_{kj} - F_{k-j}] \cdot q_{o,j} \quad (6)$$

۲-۱-۲- بررسی انتقال حرارت همرفتی داخل حفره جاذب

در مطالعات پیشین، انتقال حرارت همرفتی برای حفره‌های مکعبی بزرگ در [۲۱] و برای حفره‌های کره‌ای، نیمکره‌ای و سیلندری در [۲۲ و ۲۳] انجام شده است. بمنظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در این پژوهش، از نتیجه بدست آمده در [۲۴] استفاده شده است که برای یک حفره جاذب با دهانه روبه‌بالا، شبیه‌سازی‌های انتقال حرارت همرفتی را بصورت سه بعدی و گذرا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک نرم‌افزار ANSYS CFX 12.0 انجام داده است بنابراین رابطه (۷) به عنوان رابطه ناسلت^۱ برای دیواره‌های حفره جاذب در نظر گرفته شد:

$$Nu = \exp(-1.736 + 0.34 \ln(Ra_w)) \quad (7)$$

و بنابراین،

$$h = \frac{k_{air}}{L} 0.001 \cdot Ra_w^{0.76} \left(\frac{T_{surface}}{T_{\infty}} \right)^{0.11} \quad (8)$$

که h ضریب انتقال حرارت، L اندازه دهانه حفره، k_{air} هدایت رسانایی هوا و Ra_w عدد رایلی است. همچنین:

$$Ra_w = \frac{g \cdot \beta}{\vartheta \cdot \alpha} (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3 \quad (9)$$

و در این رابطه:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (10)$$

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{k_{air}}{\rho \cdot C_p} \quad (12)$$

و خواص هوا در روابط فوق، در دمای فیلم هوا طبق رابطه (۱۳) قابل محاسبه هستند [۲۵].

$$k_{air} = \frac{0.00031417 T_{air}^{0.7786}}{1 + \frac{-0.7116}{T_{air}} + \frac{2121.7}{T_{air}^2}} \quad (13)$$

همچنین:

$$\mu_{air} = \frac{1.425 \times 10^{-6} \cdot T_{air}^B}{1 + \frac{108.3}{T_{air}}} \quad (14)$$

همچنین:

¹ Nusselt

$$\rho_{air} = \frac{P_{air}}{RT_{air}} \quad (15)$$

که $R = 287.05 \frac{J}{kg.K}$ و P_{air} فشار هوا می باشد.
و نهایتاً:

$$C_p = 1100 \frac{kJ}{kg.K} \quad (16)$$

هنگامیکه با توجه به دمای سطوح، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محاسبه شد، مقدار شار انتقال حرارت همرفت از دیواره‌ها با توجه به رابطه (۱۷) قابل محاسبه خواهد بود:

$$q_{conv} = h \cdot (T_{avg-surface} - T_{film}) \quad (17)$$

۲-۱-۳- محاسبه توان سلول فتوولتائیک و مولد ترموالکتریک

برای محاسبه جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز سلول فتوولتائیک از رابطه (۱۸) و (۱۹) استفاده می شود [۲۶ و ۲۷]:

$$I_{sc} = I_{sc-ref} \frac{G}{G_{ref}} (1 + K_I \cdot \Delta T) \quad (18)$$

$$V_{oc} = V_{oc-ref} (1 - K_V \cdot \Delta T) \quad (19)$$

در این روابط، I_{sc-ref} و V_{oc-ref} به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در شرایط آزمایش استاندارد (شدت تابش 1000 Wm^{-2} و 25°C) هستند. ΔT مقدار اختلاف دما نسبت به درجه حرارت آزمایش استاندارد است. همچنین K_I و K_V به ترتیب ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه و ضریب دمایی ولتاژ مدار باز سلول است که توسط سازنده آن تعیین می‌شود. معمولاً برای سلول‌های مونوکریستالی سیلیکونی، K_V حدوداً 1 VK^{-1} است. اما همانطور که در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه ترموالکتریک‌ها همچون [۲۴]، مولدهای ترموالکتریک مدار باز تلقی می‌شوند لازم است تا معادله مربوط به حداکثر توان قابل استحصال از مولد (هنگامی که مقاومت داخلی با مقاومت خارجی بار برابر باشد) بیان گردد:

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{(V_{oc})^2}{R_i} \quad (20)$$

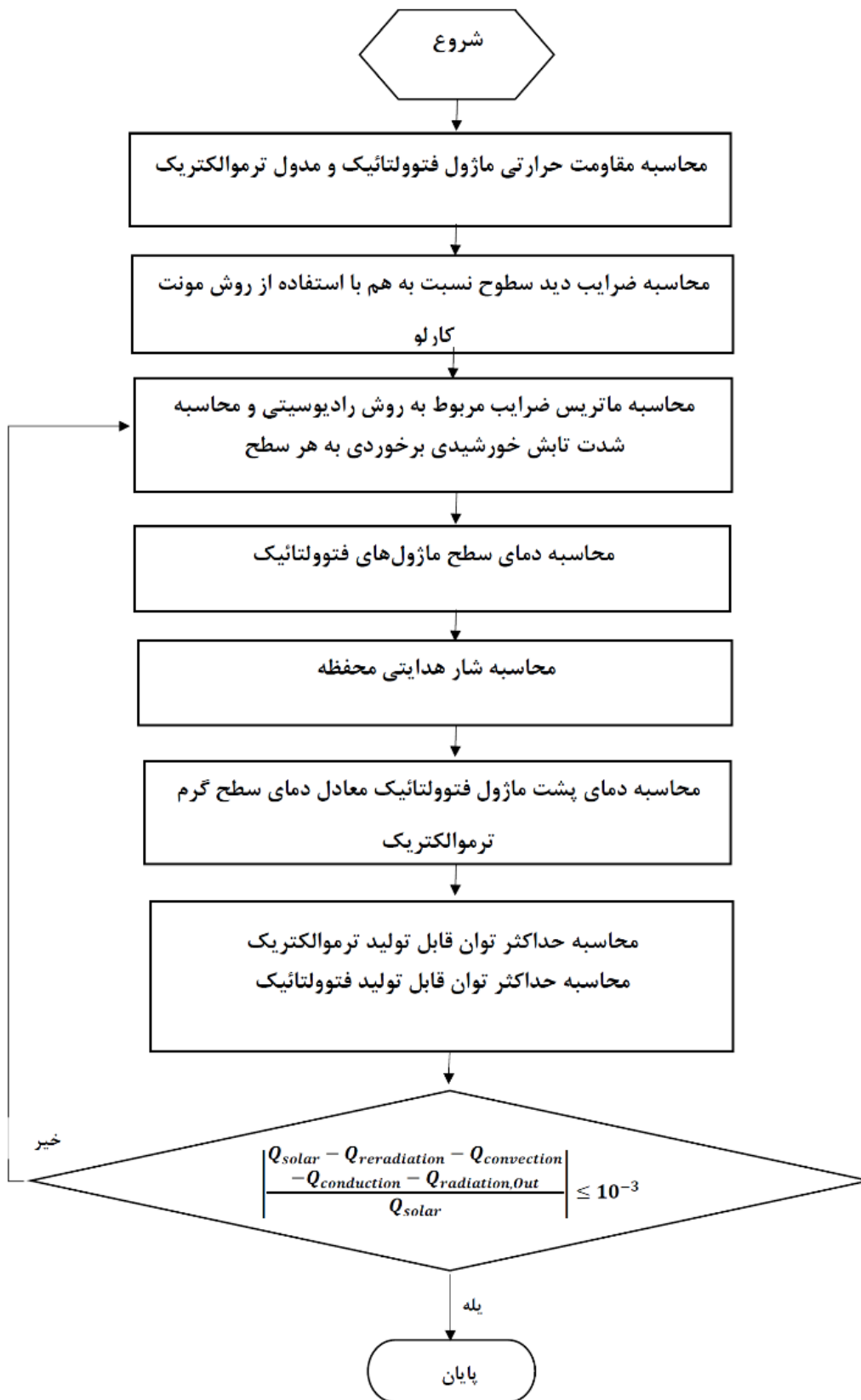
که R_i مقاومت الکتریکی داخلی مولد ترموالکتریک است که سازنده آن را تعیین می‌کند. همچنین ولتاژ مدار باز از رابطه (۲۱) که S ضریب سیبک ماژول است، به دست می‌آید.

$$V_{oc} = S \cdot (T_h - T_c) \quad (21)$$

همچنین جریان بهینه بصورت رابطه (۲۲) است:

$$I_{teg} = S \cdot (T_h - T_c) / 2T_m \quad (22)$$

که در آن $T_m = T_h + T_c / 2$



شکل ۳- الگوریتم حل معادلات حاکم بر مسئله

۲-۲- الگوریتم حل مسئله

با توجه به اینکه سیستم پیشنهادی از نوع ترکیبی بوده و همچنین مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارتی همراه با تولید توان به‌وسیله فتوولتائیک و ترموالکتریک با هم کوپل هستند، این مسئله روش حل متفاوتی داشته که مراحل آن در شکل (۳) بیان شده است. این الگوریتم در نرم افزار کدنویسی متلب پیاده‌سازی و اجرا شده است. برای حل مسئله فرض می‌شود ابتدا همه سطوح عایق بوده و لذا مقدار شار وارده به هرکدام معلوم و برابر صفر است. دمای سطح بالایی (دهانه) معادل صفر مطلق چراکه سطحی مجازی است و همچنین اینکه شار خورشیدی وارده مستقیماً به سطح پایینی برخورد می‌کند. پس از آن دمای سطوح، میزان هدایت حرارتی، میزان بازتابش و مقدار انتقال حرارت همرفت در هر مرحله محاسبه می‌شود. حل مسئله تا دستیابی به درصد خطای کمتر از ۰,۰۰۱ در بالانس انرژی ادامه می‌یابد.

$$\left| \frac{Q_{solar} - Q_{reradiation} - Q_{convection} - Q_{conduction} - Q_{radiation,Out}}{Q_{solar}} \right| \leq 10^{-3} \quad (23)$$

۲-۳- مشخصات ماژول فتوولتائیک و مدول ترموالکتریک

در این پژوهش از مبدل‌های ترموالکتریک شرکت کریوترم^۱ که ساخت کشور روسیه بوده و در بازار ایران موجود است، استفاده شده است. نمونه آن در شکل (۴) نمایش داده شده است. مشخصات این مبدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

همچنین مشخصات ماژول فتوولتائیک استفاده شده در جدول (۲) آمده است:

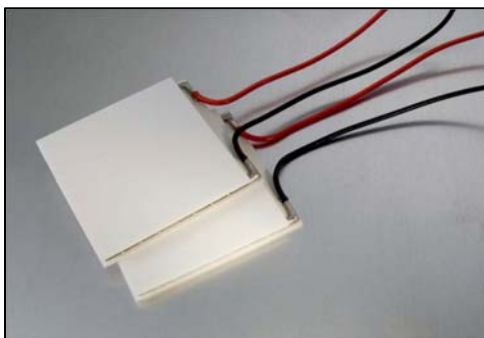
جدول ۱- مشخصات مدول ترموالکتریک TGM-127-1

پارامتر	نشانه	مقدار
عرض	W(mm)	۴۰
طول	L(mm)	۴۰
ارتفاع	H (mm)	۴,۸
ماکزیمم ولتاژ	V _{max} (V)	۳,۶
ماکزیمم جریان	I _{max} (A)	۱,۲۳
ماکزیمم توان الکتریکی	P _{max} (W)	۴,۵
بازده	η (%)	۵,۴
مقاومت الکتریکی	R _{elec} (Ω)	۳
مقاومت حرارتی	R _{th} (K/W)	۲,۶

¹ Kryotherm

جدول ۲- مشخصات سلول فتوولتائیک

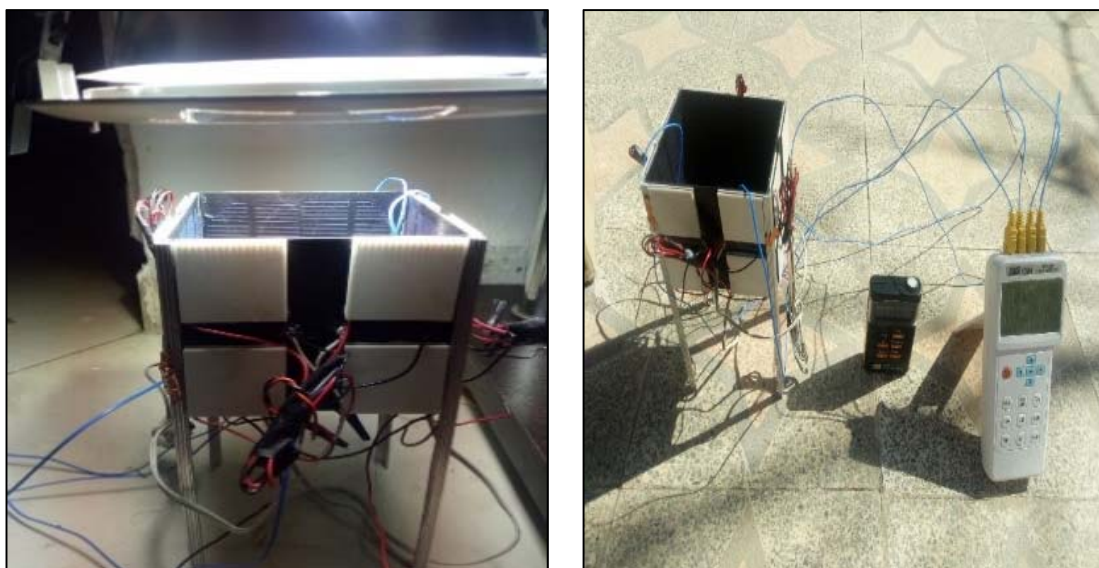
پارامتر	نشانه	مقدار
عرض	W(mm)	۱۱۰
طول	L(mm)	۱۱۰
ارتفاع	H (mm)	۵
ماکزیمم ولتاژ	V _{max} (V)	۵,۸
ماکزیمم جریان	I _{max} (mA)	۱۶۰
ماکزیمم توان الکتریکی	P _{max} (W)	۰,۹۲
بازده	η (%)	۹,۸
جریان مدار باز	I _{sc} (mA)	۱۷۶
ولتاژ مدار باز	V _{oc} (V)	۶



شکل ۴- نمونه مولدهای ترموالکتریک ساخت کریوترم [۲۸]

۳- بررسی و تحلیل نتایج

حفره مورد مطالعه در این پژوهش از یک هیبرید فتوولتائیک-ترموالکتریک در کف مکعب و ۲۰ مولد ترموالکتریک در سطوح جانبی تشکیل شده است که در معرض تابش یا سطوح توان مختلف قرار گرفته است. معادلات انتقال حرارت تابشی و جابجایی داخل حفره، هدایت حرارتی از دیواره ها و معادلات توان الکتریکی به صورت عددی حل می شوند. در ابتدا برای صحت گذاری بر عملکرد حل عددی، معادلات حاکم با فرض کلیه سطوح هیبرید حل شد و نتایج با مقادیر به دست آمده از کار تجربی فرهنگیان و همکاران [۱۸] مقایسه شد. در نمونه تجربی کل سطوح حفره از سیستم هیبرید ساخته شد به طوریکه کلیه وجوه داخلی مکعب از سلول فتوولتائیک تشکیل شده است. این نمونه در آزمایشگاه در مقابل تابش شبیه سازی شده لامپ متال هالید و نیز در شرایط واقعی در مقابل تابش خورشید تست شده است [۱۸].



شکل ۵- نمونه آزمایشگاهی تحت تابش نور لامپ متال هالید و نور خورشید [۱۸]

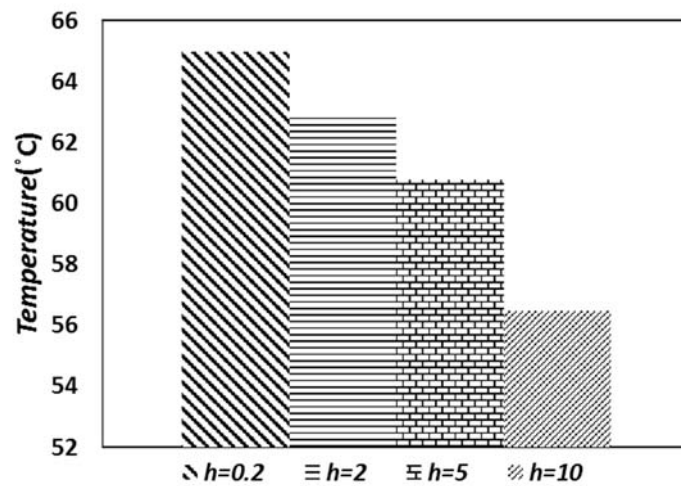
جدول ۳- مقایسه نتایج تجربی [۱۸] و عددی در حفره در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع

مدل	دمای سطح فتوولتائیک (سلسیوس)	دمای پشت فتوولتائیک (سلسیوس)	دمای پشت ترموالکتريک (سلسیوس)	توان کل (میلی وات)
عددی	۵۶,۳۷	۵۳,۳۷	۵۱,۰۷	۵۴۲,۵
تجربی [۱۸]	۵۸,۴۸	۵۷,۱۴	۵۵,۱۲	۵۸۹,۳
خطا(%)	۳,۶	۷,۹۵	۷,۳	۷,۹۶

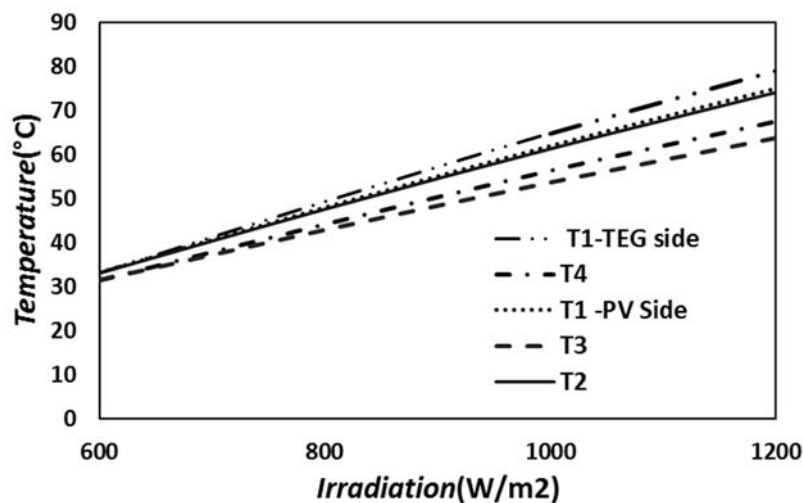
نمونه ساخته شده در شکل (۵) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از حل عددی برای یک حفره با کل سطوح هیبرید با نتایج تجربی در جدول (۳) نشان داده شده است. مقایسه برای مقادیر دما و توان نشان می دهد اختلاف حل عددی و نتایج تجربی کمتر از ۸ درصد می باشد. عمده این اختلافات ناشی از فرضیات حل عددی مانند فرض هم دما بودن کل سطح سلول، صرفه نظر از انتقال حرارت تابشی بین صفحه گرم و سرد مولد ترموالکتريک و فرض انتقال حرارت هدایتی یک بعدی در مولد ترموالکتريک و سلول فتوولتائیک ناشی می شود که در کار تجربی این مقادیر وجود دارد و پخش تابش بین سطوح و گرمای ناشی از منبع تابش در نمونه واقعی نسبت به حل عددی نیز در تولید این اختلاف دما موثر می باشد.

شکل (۶) تغییرات دمای پشت مدول ترموالکتريک نصب شده در سطوح جانبی را تحت تاثیر تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع تحت ضریب انتقال حرارت جابجایی مختلف در خارج حفره را نشان می دهد. در واقع در ضرایب انتقال حرارت بالاتر، سلول فتوولتائیک در دمای پایین تر قرار می گیرد که برای افزایش راندمان شرایط مناسب تری می باشد. همانطور که در روند شکل (۳) مشخص است در مقادیر بسیار کم انتقال حرارت جابجایی که تبادل گرما فقط از طریق هدایت با محیط اطراف است، دمای سلول فتوولتائیک به دمای ۶۹ درجه سلسیوس می رسد.

در این مقاله T_1 دمای سطوح داخلی حفره، صفحه T_2 دمای پشت سلول فتوولتائیک سطح پایینی حفره، T_3 دمای پشت مدول ترموالکتریک سطح پایین حفره و T_4 دمای پشت ترموالکتریک نصب شده در سطوح جانبی مکعب را نشان می دهد. تغییرات دمای T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4 در ضرایب جابجایی $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ محیط اطراف، در شکل (۷) نمایش داده شده است. اختلاف دمای بین T_2 و T_3 در سطح پایین عامل تولید جریان الکتریکی در مولدهای ترموالکتریک نصب شده در سیستم هیبرید می باشند. اختلاف دمای بین T_1 و T_4 عامل تولید جریان الکتریکی در مولدهای ترموالکتریک سطوح جانبی است که صفحه داغ آن ها در واقع با تابش مستقیم گرم می شوند. همانطور که در شکل (۷) نمایش داده شده است با افزایش میزان تابش ورودی به حفره دمای سطح سلول فتوولتائیک افزایش می یابد و با توجه به اختلاف دمای سطح داخل و خارج حفره، این گرما به صورت هدایت به سطوح خارجی شامل سطح گرم مولد ترموالکتریک هدایت شده و باعث افزایش دمای صفحه گرم ترموالکتریک می شود.

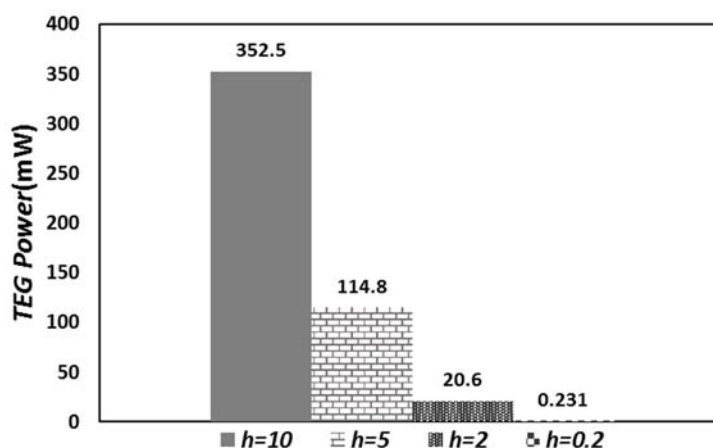


شکل ۶- تغییرات دمای سلول فتوولتائیک در ضرایب انتقال حرارت جابجایی مختلف

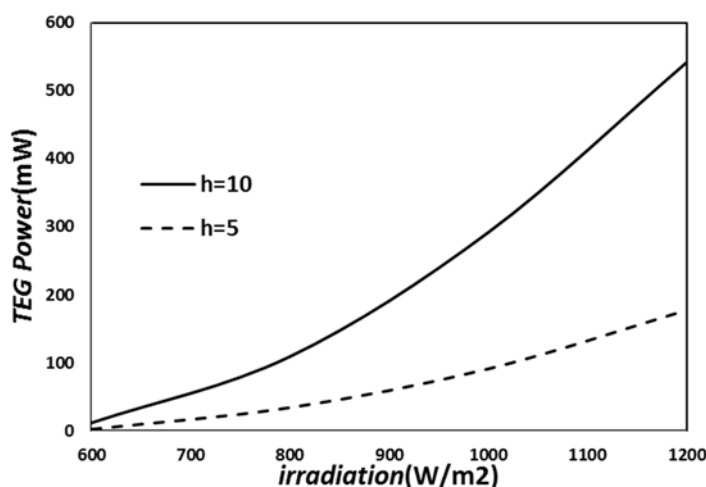


شکل ۷- تغییرات دمای سطح سلول فتوولتائیک و مولد ترموالکتریک بر اساس میزان تابش های مختلف

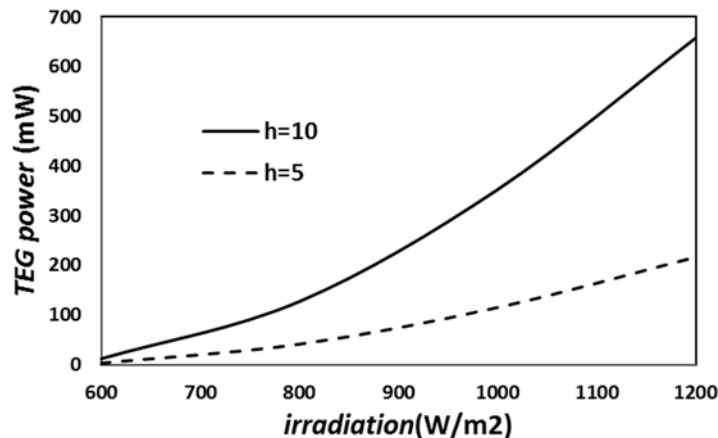
اختلاف دما بین سطح داخلی سلول فتوولتائیک، صفحه گرم و سرد مولد ترموالکتریک در هر میزان تابش وجود دارد و با افزایش میزان تابش ورودی افزایش می یابد. با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) و اختلاف دمای بین صفحه داغ و سرد مولد ترموالکتریک که در شکل (۷) نمایش داده شده است مقادیر توان تولید شده مولدهای ترموالکتریک سطوح جانبی و نیز مولد ترموالکتریک نصب شده در سیستم هیبرید در سطح پایین محاسبه می شود. شکل (۸) میزان توان تولید شده مولدهای ترموالکتریک تحت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع در دهانه حفره و در شرایط ضرایب مختلف جابجایی محیط اطراف نشان می دهد. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است با افزایش ضریب جابجایی محیط اطراف، میزان اختلاف دمای بین صفحه داغ و سرد افزایش یافته و لذا میزان توان تولیدی به بیشترین میزان خود در ضریب جابجایی ۱۰ و به عدد ۳۵۲٫۴۸ میلی وات می رسد. افزایش دو برابری ضریب جابجایی اگر چه با هزینه همراه است و تامین آن در نقاط مورد استفاده انرژی خورشیدی چندان ساده نیست، اما افزایش سه برابری توان تولیدی را نتیجه می دهد. علاوه بر آن خنک کاری سطح سلول فتوولتائیک در افزایش بازده و کاهش خرابی سلول نیز تاثیر گذار است.



شکل ۸- توان تولید شده مولدهای ترموالکتریک در شرایط ضرایب مختلف جابجایی محیط اطراف و تابش 1000 W/m^2



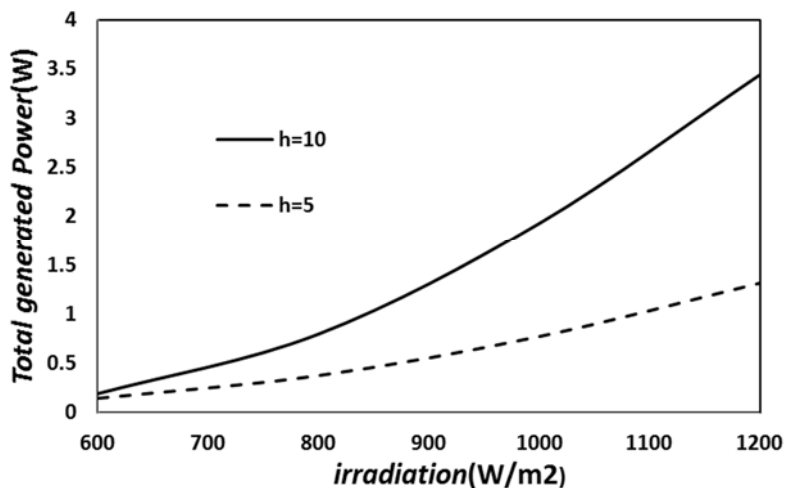
شکل ۹- تغییرات توان تولیدی مولدهای ترموالکتریک سیستم هیبرید کف حفره در ضرایب جابجایی مختلف تحت مقادیر مختلف تابش ورودی



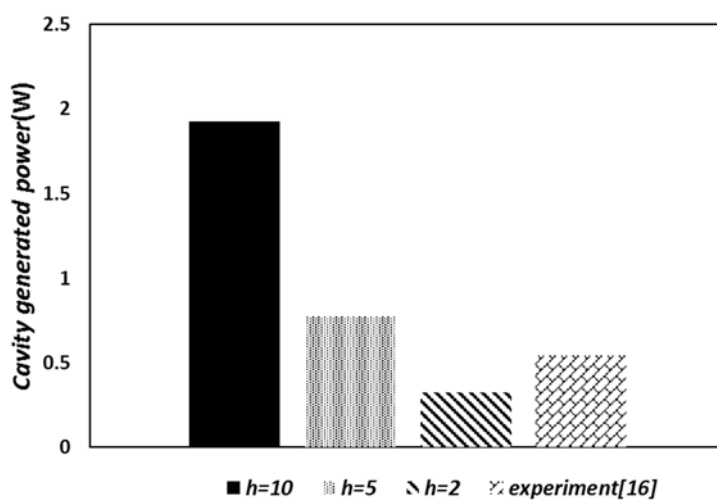
شکل ۱۰- تغییرات توان تولیدی مولدهای ترموالکتریک سطوح جانبی حفره در ضریب جابجایی مختلف تحت مقادیر مختلف تابش ورودی

خنک کاری صفحه سرد مولد ترموالکتریک به شدت در افزایش بازده سیستم هیبرید موثر می‌باشد. شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب اثر ضریب انتقال حرارت جابجایی در تولید توان مولد ترموالکتریک سیستم هیبرید کف حفره و مولدهای ترموالکتریک دیواره جانبی حفره را نشان می‌دهد. علی‌رغم وجود صفحه فتوولتائیک در کف حفره، خنک کاری پشت صفحه سرد ترموالکتریک در سطوح جانبی و سطح پایین حفره اثر مشابهی دارد و با توجه افزایش شدیدی که در میزان توان تولیدی دارد، قابلیت به‌کارگیری در مناطق مختلف را ایجاد می‌کند. افزایش میزان ضریب انتقال حرارت در افزایش اختلاف دمای بین صفحات گرم و سرد مولد ترموالکتریک که عامل اصلی تولید توان در این مولدها می‌باشد، تاثیر شدیدی دارد. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص است، با دو برابر شدن ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط خارج حفره، توان تولیدی مولدهای ترموالکتریک ۶ برابر افزایش می‌یابد. کل توان تولیدی حفره در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

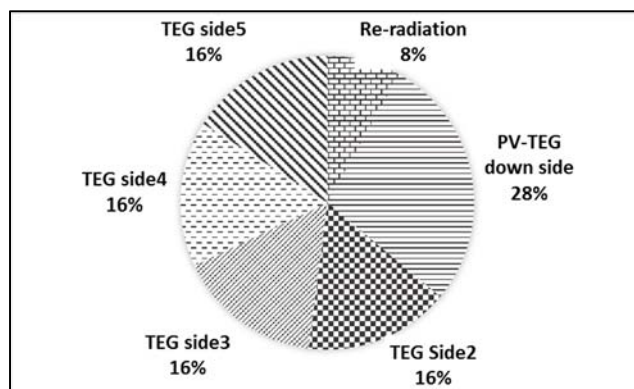
همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ضریب انتقال حرارت، اختلاف دمای بین دو صفحه مولد ترموالکتریک افزایش یافته و در نتیجه همزمان با خنک شدن صفحه فتوولتائیک، مجموع توان تولیدی سلول فتوولتائیک و مولد ترموالکتریک افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از حل عددی مدل ارائه شده در این مقاله در تابش 1000 W/m^2 در مقایسه با نتایج مقایسه نتایج تجربی و عددی در شکل (۱۲) نشان می‌دهد در محدوده ضرایب جابجایی $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ استفاده از مدول‌های ترموالکتریک در دیوار جانبی به جای سلول فتوولتائیک، میزان تولید جریان الکتریکی ۱,۴ برابر بوده لذا می‌توان با این روش علاوه بر افزایش توان، هزینه ساخت حفره جاذب را کاهش داد. در واقع حل توزیع تابش روی سطوح مختلف حفره نشان می‌دهد میزان انرژی تابشی مستقیمی که به سطح پایین حفره می‌رسد در شرایط عمود بودن تابش ورودی به دهانه حفره، تقریباً ۱,۷ برابر سایر وجوه است و لذا آرایش مناسب قرار گرفتن سلول فتوولتائیک در پایین و مولد های ترموالکتریک در سطوح جانبی می‌باشد. این توزیع در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. مقایسه نتایج در شکل (۱۳) نشان می‌دهد ۲۸ درصد انرژی تابشی به صورت مستقیم به سطح پایینی حفره برخورد می‌کند و تنها ۸ درصد میزان تابش ورودی به محیط اطراف بازتابیده می‌شود.



شکل ۱۱- کل توان تولیدی حفره تحت تابشهای مختلف ورودی



شکل ۱۲- مقایسه توان تولیدی حفره در دو ساختار ترکیب هیبرید در کف- مولد ترموالکتریک در سطوح جانبی (حل عددی) و مقادیر تجربی [۱۸] ساختار هیبرید در تمام سطوح



شکل ۱۳- درصد توزیع تابش روی سطوح مختلف حفره

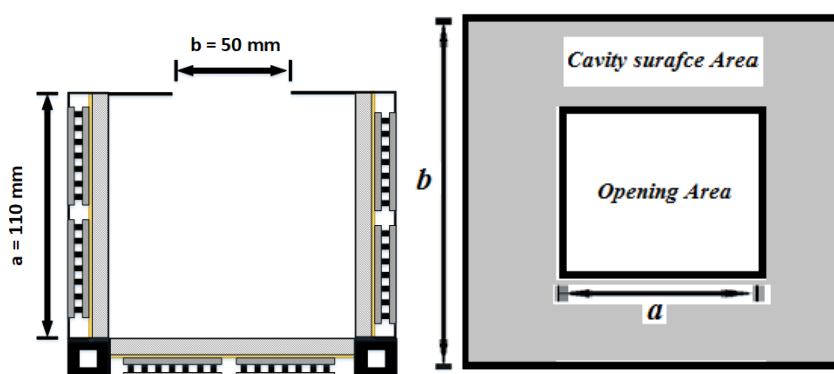
این مقدار در مقایسه با میزان بازتابش ۶۰ درصدی از سطح صفحه فتوولتائیک تخت بسیار ناچیز است و لذا می توان در محل کانون متمرکز کننده ها که با هدر رفت انرژی در اثر بازتابش مواجه هستند، از حفره جاذب و مولد ترموالکتریک با قابلیت کارکرد در دمای بالا بهره برد. جری حفره که کل سطوح داخلی مدول فتوولتائیک است در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.

۴- بهینه سازی ابعاد دهانه حفره

کاهش اندازه دهانه حفره، میزان توان تابشی ورودی به حفره را کاهش می دهد و لذا توان تولیدی خروجی حفره کاهش می یابد، اما از طرفی با کاهش میزان هدر رفت بازتابش، بازده سیستم را افزایش می دهد. برای به دست آوردن اندازه بهینه دهانه حفره ابتدا پارامتر بسیار مهم "بازده جذب حفره" بررسی می شود. بازده جذب حفره از معادله (۲۴) محاسبه می شود [۲۹]:

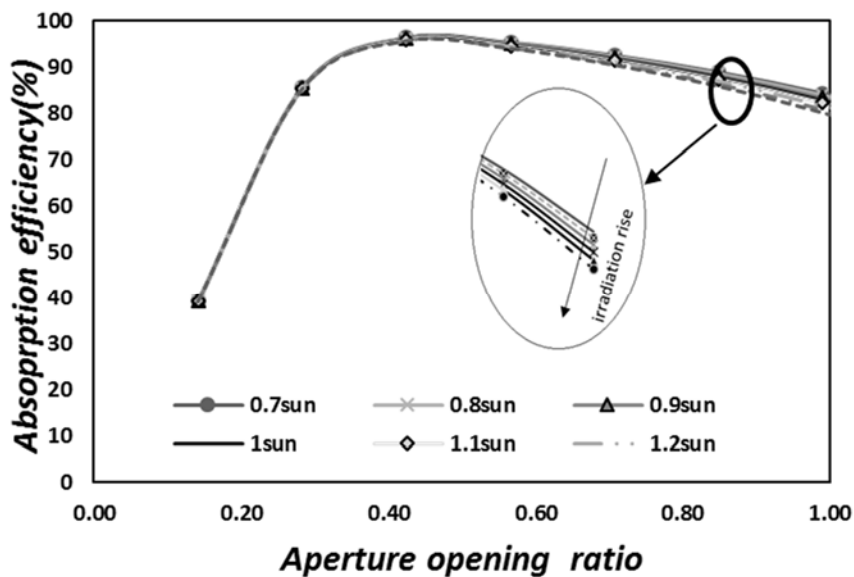
$$\eta_{absorption} = \frac{\alpha_{eff} P_{aperture} - \epsilon_{eff} A_{aperture} T^4}{Q_{solar}} \quad (24)$$

که در آن α_{eff} و ϵ_{eff} به ترتیب ضریب جذب و پخش حفره، $P_{aperture}$ میزان توان تابشی ورودی به دهانه حفره، $A_{aperture}$ مساحت دهانه حفره، Q_{solar} میزان تابش خورشید در سطح حفره و T دمای حفره می باشد. پارامتر مهم دیگر برای بررسی اثر دهانه، پارامتر "نسبت باز شدگی دهانه" می باشد که از نسبت اندازه مساحت دهانه به اندازه مساحت سطح حفره به دست می آید که در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. جزئیات تغییرات بازده جذب تابش نسبت به تغییرات اندازه دهانه در تابش بین ۰٫۷ تا ۱٫۲ در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است، با افزایش اندازه دهانه در هر مقدار تابش میزان بازده جذب تا یک مقدار ماکزیمم بالا رفته و سپس روند نزولی راطی می کند.



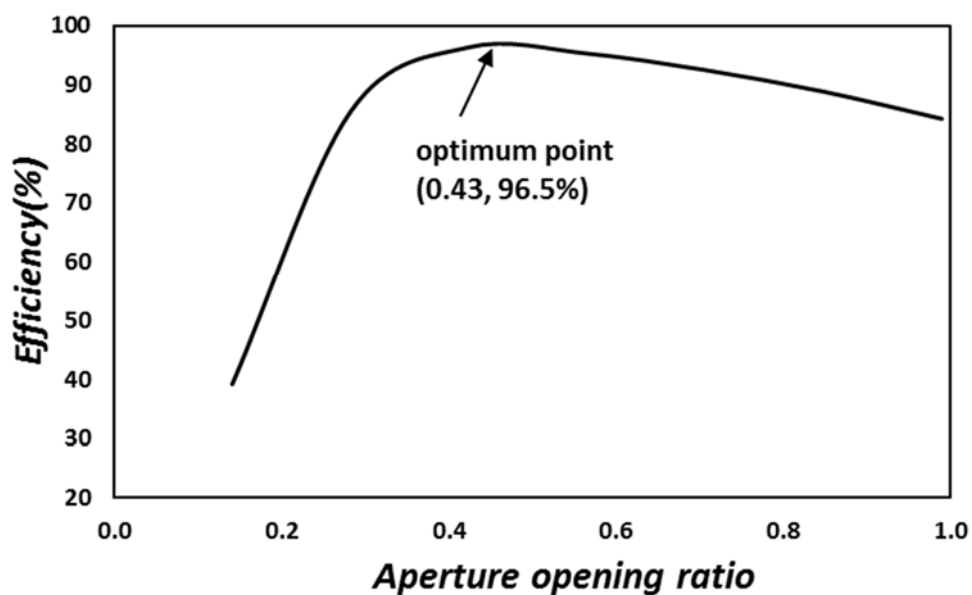
شکل ۱۴- نسبت باز شدگی دهانه حفره

¹ Aperture Opening Ratio



شکل ۱۵- تغییرات بازده جذب حفره بر حسب نسبت بازشدگی دهانه

شکل (۱۶) نمودار بیشترین بازده جذب بر حسب نسبت میزان بازشدگی دهانه را در تابش های مختلف نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است، بازده جذب در نسبت باز شدگی ۰,۴۳ به ماکزیمم مقدار خود یعنی ۹۶,۵ درصد می رسد.



شکل ۱۶- تغییرات بازده جذب حفره بر حسب نسبت بازشدگی دهانه

۵- آنالیز اقتصادی

هزینه یکنواخت یا همتراز شده برق (LCOE)^۱، روشی مبتنی بر محاسبه ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری تولید برق در کل دوره عمر پروژه می‌باشد که در آن تولید یک کیلووات ساعت برق از تقسیم ارزش فعلی کل هزینه‌های انجام شده برای تولید برق تولیدی محاسبه می‌شود [۳۰]. LCOE از فرمول (۲۵) قابل محاسبه می‌باشد [۳۱]:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^N (I_t + O_t + M_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T P_t (1-d)^t / (1+r)^t} \quad (25)$$

که در آن N طول عمره پروژه، I_t هزینه سرمایه‌گذاری شامل هزینه ساخت (\$)، O_t هزینه بهره‌برداری (\$)، M_t هزینه تعمیر و نگهداری (\$) و P_t نرخ تولید انرژی سالانه برحسب (kWh/year). d نرخ کاهش تولید سالانه^۲ (%) و r نرخ تنزیل^۳ (%) می‌باشد.

در این پژوهش I_t برای سیستم هیبرید ارائه شده ۸۲,۷۵ دلار بر مبنای قیمت ساخت نمونه آزمایشگاهی می‌باشد که با در نظر گرفتن نرخ تنزیل ۰.۸٪، نرخ کاهش تولید ۰.۵٪، نرخ تعمیر و بهره‌برداری ۷,۵ درصد نرخ سرمایه‌گذاری سالانه و طول عمر ۳۰ سال، میزان LCOE برابر ۶,۷۷ \$/kWh می‌باشد. نرخ LCOE برای سلول فتوولتائیک ۰,۹۲ و برای هیبرید صفحه تخت متشکل از سلول فتوولتائیک و چهار مولد ترموالکتریک ۵,۶۵ می‌باشد [۱۸]. مقایسه هزینه تولید انرژی روشهای مختلف اشاره شده نشان می‌دهد هزینه اصلی در ساختار هیبرید، مولدهای ترموالکتریک است و بنابراین ساخت حفره با هزینه بالاتری همراه خواهد بود و در نتیجه برق تولید شده در مقیاس آزمایشگاهی گرانتر است. تحقیقات چاوز و همکاران [۵] نشان می‌دهد قیمت مولدهای ترموالکتریک فعلی با افزایش تعداد در مقیاس صنعتی تا حد سلول فتوولتائیک کاهش پیدا می‌کند و لذا کاربری آن‌ها را از نظر اقتصادی توجیه می‌کند. البته با رشد فناوری در ساخت مولدهای ترموالکتریک با درجه شایستگی بالاتر، میزان توان تولیدی در مقابل اختلاف دمایی کمتر افزایش یافته و لذا هزینه برق تمام شده کمتر خواهد شد.

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، مدل جدیدی از سامانه ترکیبی ترموالکتریک-فتوولتائیک ارائه شده است. در این سامانه با بهره‌گیری از ساختار حفره جاذب، بازتابش پرتوهای خورشید از روی سلول فتوولتائیک در جهت‌های مختلف جذب شده و راندمان تولید توان افزایش می‌یابد. میزان عملکرد در شدت تابش‌های مختلف بررسی شده است. نتایج حل عددی معادلات حاکم بر مسئله نشان می‌دهد:

- ۲۸ درصد تابش ورودی که بیشترین میزان تابش می‌باشد در سطح پایین حفره اتفاق می‌افتد و لذا بهینه‌ترین محل نصب سیستم هیبرید در وجه پایینی حفره است.

¹ Levelized Cost of Energy

² degradation rate

³ Discount rate

- از طرفی آنالیز انتقال حرارت نشان می‌دهد میزان بازتابش از دهانه حفره حدود ۸ درصد تابش ورودی است در حالیکه در صورت عدم استفاده از حفره این میزان حدود ۶۰ درصد می‌باشد.
- در این پژوهش با بهره‌گیری از ضرایب مختلف انتقال حرارت در سطح خارجی میزان توان تولیدی و بازده سیستم بررسی شد. با افزایش ضریب انتقال حرارت میزان دمای صفحه سرد مبدل ترموالکتریک کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف دمای صفحه گرم و سرد بالا رفته و در نتیجه توان تولید ترموالکتریک افزایش می‌یابد. افزایش ضریب انتقال حرارت خارج حفره باعث کاهش دمای سلول فتوولتائیک نیز می‌شود که باعث عملکرد بهتر سلول فتوولتائیک می‌شود.
- تابش وارده به حفره شامل طول موج‌های مختلف است، بنابراین همه آن قادر به تولید انرژی الکتریکی در فتوولتائیک نبوده و بخش مادون قرمز آن فقط موجب افزایش دمای فتوولتائیک‌ها می‌گردد. حل عددی نشان می‌دهد حداکثر مقدار تابش در حالتی که منبع تابش عمود بر سطح ورودی است به وجه پایین وارد می‌شود. از طرفی بازتابش از سطح فتوولتائیک نیز در محدوده مادون قرمز بوده و در سطوح دیگر تولید گرما می‌کند. این اختلاف دما در سطح جانبی به 12°C می‌رسد که با این اختلاف دما میزان توان تولیدی به ۵۴۱ میلی وات در ضریب انتقال حرارت ۱۰ می‌رسد.
- ساختار ارائه شده برای استفاده سیستم هیبرید در وجه پایینی حفره و استفاده از همه طیف‌های تابشی برای نخستین بار در سیستم‌های هیبرید فتوولتائیک ترموالکتریک است. بررسی اثر ضریب انتقال حرارت خارجی بر توان تولید ترموالکتریک نشان می‌دهد در تابش ورودی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع با افزایش ضریب انتقال حرارت از ۲ به ۱۰، توان ترموالکتریک از ۲۰ میلی وات به ۳۵۰ میلی وات افزایش می‌یابد. نتایج محاسبه کل توان خروجی حفره نشان می‌دهد در شرایط مشابه توان از ۰,۷۷ وات به ۱,۹ وات افزایش می‌یابد.
- بررسی تغییرات بازده جذب تابش ورودی نسبت به میزان تابش و اندازه دهانه نشان می‌دهد که با افزایش اندازه دهانه در یک مقدار مشخص تابش، میزان بازده جذب تا یک مقدار ماکزیمم بالا رفته و سپس روند نزولی را طی می‌کند. ماکزیمم بازده جذب انرژی خورشید حفره در نسبت باز شدگی ۰,۴۳، ۹۶,۵ درصد می‌باشد.

ساختار هیبرید ارائه شده یک نوآوری جدید در بهره‌گیری حداکثری از توان تابش خورشید می‌باشد. با توجه به نوع قرارگیری سلول فتوولتائیک در کف حفره و مولدهای ترموالکتریک در سطوح جانبی این حفره قابلیت جذب طول موج‌های مختلف تابش خورشید را دارد که این امکان در سلول فتوولتائیک منفرد وجود ندارد. این سیستم امکان جذب تابش و تولید توان در وجه مختلف خود را دارد و لذا می‌تواند با سیستم ردیاب خورشید و یا حتی بدون ردیاب توان مناسبی را تولید نماید. در حال حاضر قیمت برق ترانس شده برای این ساختار $6,77 \text{ \$/kWh}$ می‌باشد که در مقایسه با قیمت انرژی حاصل از سیستم حفره با سطوح داخلی کامل فتوولتائیک بهینه است. مقایسه قیمت انرژی حاصله از سیستم هیبرید نشان دهنده وابستگی شدید سیستم به قیمت مولدهای ترموالکتریک است و به صرفه شدن اقتصادی این طرح به قیمت مولدهای ترموالکتریک بستگی دارد.

با پیشرفت مولدهای ترموالکتریک و استفاده از مواد با درجه شایستگی بالاتر در ساخت این مولدها می توان از اختلاف دماهای کمتر که در روزهای غیر آفتابی اتفاق می افتد حداکثر بهره را به دست آورد و قیمت انرژی تولید شده را کاهش داد. سامانه ترکیبی ارائه شده در حفره با توجه به کاهش بازتابش خروجی از دهانه حفره، استفاده از تمام طول موج های تابش و خنک کاری سطح خارجی حفره یک نمونه کاملاً نوین از سامانه های ترکیبی فتوولتائیک- ترموالکتریک است که با بکارگیری هر دو نوع روش هیبرید کردن مدول های فتولتائیک- ترموالکتریک بالاترین بازده را ارائه می کند.

مراجع

- [1] International Energy Outlook 2016, Available: <http://www.eia.gov/ieo>
- [2] World Energy Consumption. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption.
- [3] Sundarraj, P., Maity, D., Roy, S., and Taylor, R. A., "Recent Advances in Thermoelectric Materials and Solar Thermoelectric Generators—a Critical Review", RSC Advances., Vol. 4, pp. 46860-46874, (2014).
- [4] Zare, M., Ramin, H., and Hosseini, R., "Optimization of Segmented Thermoelectric Generator and Calculation of Performance", Amirkabir Journal of Science and Research (Mechanical Engineering) Vol. 45, pp. 27-29, (2013).
- [5] Cha'vez-Urbiola, E. A., Vorobiev, Yu. V., and Bulat, L.P., "Solar Hybrid Systems with Thermoelectric Generators", Solar Energy, Vol. 86, pp. 369–378, (2012).
- [6] Miljkovic, N., and Wan, E. N., "Modeling and Optimization of Hybrid Solar Thermoelectric Systems with Thermosiphons", Solar Energy, Vol. 85 pp. 2843–2855, (2011).
- [7] Hassasniadoon, M., AbbasNejad, A., and Moazemigoudarzi, A., "Experimental Investigation of Fresnel Lens Application in a Solar Water Heater with the Electricity Generation via Thermoelectric Module", Journal of Solid and Fluid Mechanic, Vol. 4, pp. 159-169, (2014).
- [8] Deng, Y., Zhu, W., Wang, Y., and Shi, Y., "Enhanced Performance of Solar-driven Photovoltaic Thermoelectric Hybrid System in an Integrated Design", Solar Energy, Vol. 88, pp. 182–191, (2013).
- [9] Li, Y., Witharana, S., Cao, H., Lasfargues, M., Huang, Y., and Ding, Y., "Wide Spectrum Solar Energy Harvesting through an Integrated Photovoltaic and Thermoelectric System", Particuology, Vol. 15, pp. 39–44, (2014).
- [10] Lina, W., Shih, T., Zheng, J., Zhang, Y., and Chen, J., "Coupling of Temperatures and Power Outputs in Hybrid Photovoltaic and Thermoelectric Modules", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 74, pp. 121–127, (2014).

- [11] Zhang, J., Xuan, Y., and Yang, L., "Performance Estimation of Photovoltaic Thermoelectric Hybrid Systems", *International Journal of Energy*, Vol. 78, No. 15, pp. 895-903, (2014).
- [12] Panga, W., Liu, Y., Shao, S., and Gao, X., "Empirical Study on Thermal Performance through Separating Impacts from a Hybrid PV/TE System Design Integrating Heat Sink", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 9-12, (2015).
- [13] Wu, Y., Wu, S., and Xiao, L., "Performance Analysis of Photovoltaic-thermoelectric Hybrid System with and without Glass Cover", *International Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 93, pp. 151-159, (2015).
- [14] Najafi, H., and Woodbury, K. A., "Modeling and Analysis of a Combined Photovoltaic Thermoelectric Power Generation System", *Journal of Solar Energy Engineering, ASME*, Vol. 135, No. 3, pp. 031013-031013-8, (2013).
- [15] Fisac, M., Villasevil, F.X., and López, F., "High-efficiency Photovoltaic Technology Including Thermoelectric Generation", *Journal of Power Sources*, Vol. 252, pp. 264-269, (2014).
- [16] Najafi, H., and Woodbury, K.A., "Optimization of a Cooling System Based on Peltier Effect for Photovoltaic Cells", *Solar Energy*, Vol. 91, pp. 152-160, (2013).
- [17] Vishal, V., Aarti, K., and Singh, B., "Complementary Performance Enhancement of PV Energy System through Thermoelectric Generation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 1017-1026, (2016).
- [18] Farhangian Marandi, O., Ameri, M., and Adelshahian, B., "The Experimental Investigation of a Hybrid Photovoltaic Thermoelectric Power Generator Solar Cavity-Receiver", *Solar Energy*, Vol. 161, pp. 38-46, (2018).
- [19] Howell, J., Siegel, R., and Pinar, M., "*Thermal Radiation Heat Transfer*", Fifth Ed, pp. 222- 248, New York, Taylor and Francis Inc., (2002).
- [20] Modest, M. F., "*Radiative Heat Transfer, Third Edition*", pp. 269-278, Elsevier, Science and Technology, London, (2013).
- [21] Clausing, A. M., Waldvogel, J. M., and Lister, L. D., "Natural Convection from Isothermal Cubical Cavities with a Variety of Side Facing Apertures", *Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 407-412, (1987).
- [22] Leibfried, U., and Ortjohann, J., "Convective Heat Loss from Upward and Downward-facing Cavity Solar Receivers: Measurements and Calculations", *J. Solar Energy Engineering*, Vol. 117, pp. 75-84, (1995).
- [23] Taumoefolau, T., Paitoonsurikarn, S., Hughes, G., and Lovegrove, K., "Experimental Investigation of Natural Convection Heat Loss from a Model Solar Concentrator Cavity Receiver", *Solar Energy Engineering*, Vol. 126, pp. 801-807, (2004).

- [24] Suter, C., “Thermoelectric Conversion of Concentrated Solar Radiation and Geothermal Energy”, Phd Thesis, ETH, Zurich, Switzerland, (2013).
- [25] 801 Database Structure and Properties, Design Institute for Physical Property Research, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), New York, USA, (2010).
- [26] Sera, D., Teodorescu R., and Rodriguez, P., “PV Panel Model Based on Data Sheet Values”, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vigo, Spain, pp. 2392–2396, (2007).
- [27] Meflah, A., Mahrane, A., Madjid, C., Khadidja, R., Hachemi, R., and Smara Z., “Current-Voltage Characteristic Modeling of a Silicon Micromorphous Photovoltaic Module”, IEEE Xplore, 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC'15), Marrakech & Ouarzazate, Morocco, pp. 1-6, (2015).
- [28] Kryotherm Company Catalogue(Informational Booklet) Available: <http://kryothermtec.com/catalogs.html>
- [29] Steinfield, A., and Schubnell, M., “Optimum Aperture Size and Operating Temperature of a Solar Cavity-Receiver”, Solar Energy, Vol. 50, pp. 19-25, (1993).
- [30] Mahmoodi, S., Berahmandpour, H., and Heydari, K., “Electricity Cost Evaluation by LCOE Algorithm in Different Energy Production Technology in IRAN”, 30th International Power Sytem Confrence, Tehran, Iran, 23-25 Nov, (2015).
- [31] Branker, K., Pathak, M. J. M., and Pearce, J. M., “A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 4470– 4482, (2011).

فهرست نمادهای انگلیسی

اندازه وجوه (m)	a
اندازه دهانه حفره (m)	b
ضریب دید	F
جریان اشباع (A)	I_o
شار تابش (Wm^{-2})	G
طول مشخصه جابجایی (m)	L
عدد ناسلت	Nu
توان الکتریکی (W)	P
شار رادیوسیتی (Wm^{-2})	q_o
هدایت حرارتی (Wm^{-2})	Q
مقاومت الکتریکی (Ω)	R_i
مقاومت حرارتی (kW^{-1})	R
عدد رایلی	Ra

ضریب سیبک (VK^{-1})	S
دما (K)	T
ضریب انتقال حرارت جابجایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)	h
هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	k
نرخ تنزیل (%)	r
نرخ کاهش تولید الکتریکی (%)	d

نمادهای یونانی

لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α
ثابت استفان - بولتزمن ($Wm K^{-4}$)	σ
ضریب پخش تابشی	ε
ضریب دمایی جریان (VK^{-1})	μ_I
ضریب دمایی ولتاژ (VK^{-1})	μ_V

زیر نویس ها

هوا	air
مقدار متوسط	Ave
سلول فتوولتائیک	PV
مولد ترموالکتریک	TEG
سطح	S
مرجع	ref
زمان	t

Abstract

In this study, a novel model of thermoelectric-photovoltaic hybrid system installed in cubical solar cavity receiver is presented. The results show that generated power in this cavity hybrid system is two times more than generated power by flat plate hybrid system under different irradiation levels. Heat transfer analysis shows that the maximum irradiation input to the downside surface of the cavity and so the hybrid system should installed on this surface. The results show that generated power in this cavity hybrid system is two times more than generated power by flat plate hybrid system under different irradiation levels. Consequently, the cost of produced energy by applying Photovoltaic-Thermoelectric hybrid module in one side and thermoelectric generators in other sides is 6.77\$/kWh and 40% less than all side hybrid cavity. The results show that increasing the heat convection coefficient from 5 to 10, increase the generated power 114.8 mW to 352.5 mW.