

## شبیه سازی و بررسی پارامتری سیستم تولید سه گانه توان، گرما و تبرید با استفاده از سلول های خورشیدی متمرکز و خنک کننده ترموالکتریک

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sina.ashjari.aqdam@gmail.com  
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، s.jafarmadar@urmia.ac.ir  
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sh.khalilarya@urmia.ac.ir  
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، a.chitsaz@urmia.ac.ir

**سینا اشجاری اقدم**  
**صمد جعفرمدار\***  
**شهرام خلیل آریا**  
**عطا چیت ساز خوبی**

### چکیده

در بررسی پیش رو یک سیستم نوین تولید سه گانه گرمایش، توان الکتریکی و سرمایش بر پایه تابش خورشیدی و با استفاده از سلول های خورشیدی متمرکز و خنک کننده های ترموالکتریک پیشنهاد شده است. شبیه سازی سیستم به صورت تحلیلی انجام گرفته و مدل صفر بعدی برای خنک کننده ترموالکتریک و همچنین مدل شبکه مقاومت گرمایی برای شبیه سازی دقیق تر بخش خنک کاری سلول خورشیدی متمرکز استفاده شده است. نتایج بررسی نشان دهنده آن است که سیستم پیشنهادی توانایی تولید توانی در حدود ۲۷۰ کیلووات و آب گرم و سرد مصرفی با دماهای ۵۰ و ۱۰ درجه سلسیوس را در دی های ۱۰ و ۲ کیلوگرم بر ثانیه با استفاده از ۲ مترمربع سلول خورشیدی متمرکز با ضریب تمرکز ۱۰۰۰ که به صورت اجزای ۱×۱ سانتی متری مورد استفاده قرار می گیرند، دارا می باشد. بررسی پارامتری صورت گرفته بر روی سیستم برای ساعات مختلف روز نشان دهنده آن است که تابش خورشیدی اثری حداقلی بر روی دمای آب سرد خروجی داشته ولی توان تولیدی را به شدت متاثر می کند.

**واژه های کلیدی:** انرژی خورشیدی، انرژی تجدید پذیر، تولید همزمان سه گانه، خنک کننده ترموالکتریک، سلول خورشیدی متمرکز، نیاز انرژی.

## Parametric Study and Simulation of A Tri-generation System Based on Concentrated PV and Thermoelectric Cooler

**S. Ashjari-Aqdam**  
**S. Jafarmadar**  
**Sh. Khalil-Aria**  
**A. Chitsaz-Khoi**

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

### Abstract

In the present study, a novel tri-generation system is proposed. The system produces heat, electric power, and cooling water using concentrated solar cells alongside thermoelectric coolers. The simulation of the system is performed analytically. A zero-dimensional model for thermoelectric cooler is applied and the thermal resistance network model is used for a more accurate simulation of the cooling system of the concentrated solar cells. The results indicate that the system can deliver 270 kW electrical power and 2 kg/s of cold water flow in 10°C and 10 kg/s of hot water flow in 50°C using 1000× CPV panels with an overall surface area of about 2 m<sup>2</sup> which are divided into 1×1 cm pieces. The parametric study conducted on the system for different hours of the day shows that solar radiation has a minimal effect on the output cold water temperature, but it strongly affects the generated power.

**Keywords:** Solar energy, Renewable energy, Tri-generation, CPV, TEC, Energy demand.

### ۱- مقدمه

خاص و مورد نیاز مصرف کنند شرط دیگری است که باید برای تامین نیازهای جوامع تامین گردد. بنابراین سیستم هایی که بتوانند با مصرف انرژی -علی الخصوص انرژی های تجدید پذیر- نیازهای اصلی مرتبط با انرژی را تامین کنند بسیار حائز توجه خواهند بود. سیستمی که بتواند به صورت همزمان نیاز به توان الکتریکی، گرمایش و سرمایش را برای یک واحد و یا مجموعه خاص تامین کرده و در عین حال برای ورودی انرژی از منابع تجدید پذیر مانند تابش خورشیدی بهره مند شود برای حال و آینده جوامع بشری بسیار مفید فایده خواهد بود.

در زمینه تولید همزمان با توجه به اهمیت و گستردگی موضوع تحقیقات فراوانی توسط محققین در سالیان اخیر صورت گرفته است. در متداول ترین حالت یک سیستم به تولید همزمان توان و گرما می پردازد که این سیستم به اختصار CHP خوانده می شود. در گام بعدی می توان

بنابر آنچه که دانش فعلی ما ارائه می دارد، در آینده ای نچندان دور بشر ملزم به تامین تمام نیازهای انرژی خود از منابع تجدید پذیر و - در راس آن ها- تابش خورشیدی خواهد بود. مقایسه میزان انرژی تابیده شده به زمین با میزان نیاز انرژی جوامع امروزی موید آن است که می توان به راحتی با تبدیل بخشی کوچک از تابش وارد شده به زمین به انرژی های مطلوب و ذخیره سازی آن، پاسخگوی تمام نیازهای جوامع بود.

در دسترس بودن انرژی و امکان استفاده از آن اگرچه شرط لازم برای تامین نیازهای جوامع است، اما شرط کافی نیست. در واقع بهره مندی از تجهیزات و سیستم هایی که بتوانند انرژی را برای مصارف

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.jafarmadar@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۸/۱۶

از گرما اتلافی سیستم برای استحصال تبرید نیز بهره جست که به این گونه سیستم‌ها، تولید سه گانه و یا CCHP اتلاق می‌گردد. برای تامین انرژی مصرفی سیستم‌های تولید همزمان می‌توان از منابع تجدید پذیر مختلفی بهره جست. استفاده از انرژی زمین گرمایی [۱]، استفاده از تابش خورشیدی [۲] و استفاده از انرژی باد [۳] نمونه‌هایی از این بهره گیری هستند.

استفاده از تابش خورشیدی در سیستم‌های تولید همزمان به علت در دسترس بودن، عدم هزینه و همچنین سهولت استفاده، در بسیاری از پروژه‌های تجاری و پژوهشی مد نظر قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای نحوه بهره گیری از تابش خورشید برای تولید همزمان نیز پیشنهاد شده است. استفاده از یک گردآورنده خورشیدی و منبع ذخیره کننده انرژی در کنار یک چرخه رانکین آلی و یک چرخه تبرید تراکمی [۴] و یا بهره گیری از یک گردآورنده سلول‌های خورشیدی و گرمایی در کنار چرخه‌های تبرید تراکمی و همچنین ذخیره سازی انرژی [۵] نمونه‌هایی از این دست اند. علاوه بر این پیشنهادها، دیگری نیز در زمینه تسهیل و گسترش استفاده از سیستم‌های تولید همزمان در پژوهش‌های محققین صورت گرفته است. سیستم تولید همزمان مقیاس کوچک با استفاده از تابش خورشیدی با یک سیستم گردان گردآورنده خورشیدی در کنار یک میکروتوربین و تبرید تراکمی [۶] نمونه ای از این بررسی‌هاست. مقیاس توان، گرما و تبرید تولیدی در سیستم‌های تولید همزمان از مقادیر کافی برای یک بلوک و واحد مسکونی گرفته تا مقادیر بسیار بالا، مورد بررسی قرار گرفته است. در گزارش عملکرد یک نمونه سیستم تولید همزمان گزارش شده است که این سیستم توانایی تولید ۹۰ مگاوات توان الکتریکی، ۲۵۰۰ کیلوگرم در ثانیه آب سرد با دمای  $7^{\circ}\text{C}$  و  $34/8$  کیلوگرم بر ثانیه بخار داغ با دمای  $500^{\circ}\text{C}$  را دارا است [۷].

سلول‌های خورشیدی به عنوان اصلی ترین و در دسترس ترین تجهیزات تبدیل تابش خورشیدی به انرژی الکتریکی همواره یکی از اساسی ترین رکن‌های سیستم‌های تولید انرژی و تولید همزمان بر پایه تابش خورشیدی بوده‌اند. نکته ای که سلول‌های خورشیدی را برای استفاده در سیستم‌های تولید همزمان جذاب جلوه می‌دهد، ایجاد گرما در سلول خورشیدی در کنار تولید توان است و جالب تر آن که با دفع هر چه بیشتر این گرما از سلول خورشیدی می‌توان بازده آن را نیز بهبود بخشید. ترکیب سلول‌های خورشیدی با دیگر فن آوری‌ها به وفور در تحقیقات محققین مشاهده می‌شود. ترکیب سلول‌های خورشیدی با پیل‌های سوختی PEM [۸] نمونه ای از این دسته است. بررسی امکان استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه سلول خورشیدی در نواحی معتدل و نیمه گرمسیری نشان می‌دهد که در یک نمونه کوچک برای استفاده‌های مسکونی، زمان بازگشت سرمایه سیستم در حدود ۱۲ سال است [۹] و بنابراین برای طراحی و استفاده از یک سیستم معقول باید اندازه و مقیاس سیستم در حدود چند ده مگاوات انتخاب گردد.

دمای عملکرد سلول‌های خورشیدی متداول معمولاً پایین بوده و این دمای پایین بازده و کارایی چرخه‌های متصل شده به سلول‌های خورشیدی از قبیل تولید توان و تبرید را پایین می‌آورد. در سال‌های اخیر فناوری سلول‌های خورشیدی متمرکز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این سلول‌های خورشیدی با استفاده از سیستم‌های متمرکز کننده تابش خورشیدی مانند انواع آینه‌ها و عدسی‌ها، باعث تمرکز

تابش خورشیدی بین چنده ده تا حدود ۱۰۰۰ برابر می‌شوند [۱۰]. با تمرکز تابش در روی سلول خورشیدی طبعاً میزان انرژی دریافتی سلول خورشیدی بالا رفته و دمای آن بیشتر می‌شود. در سلول‌های خورشیدی دمای بالا امری غیرمطلوب است و باعث کاهش بازده سلول خورشیدی می‌گردد. اما به علت اینکه سطح مقطع سلول‌های خورشیدی متمرکز در مقایسه با سلول‌های خورشیدی متداول به همان میزان تمرکز تابش کمتر است، می‌توان در این سلول‌ها از مواد بسیار باکیفیت تر و البته گرانتر استفاده کرد تا بازده سلول خورشیدی در دماهای بالا نیز همچنان مطلوب باشد. بازده این سلول‌های خورشیدی در نمونه‌های تجاری در دسترس، با توجه به ضریب تمرکز و دمای کاری سلول خورشیدی بین ۴۰٪ تا ۴۵٪ متغیر است [۱۱]. نیاز به خنک کاری سلول‌های خورشیدی متمرکز که در حالت استفاده منفرد، عاملی منفی و هزینه بر محسوب می‌شود، در هنگام استفاده از آن‌ها در سیستم‌های تولید همزمان به عنوان یک نقطه قوت در آمده و باعث تامین یک منبع گرمایی دما بالا برای عملکرد سایر بخش‌های سیستم می‌گردد.

استفاده از سلول‌های خورشیدی متمرکز برای تولید همزمان اخیراً مورد توجه محققین بوده است [۱۲]. بهره جستن از سلول خورشیدی متمرکز در کنار چرخه تبرید جذبی و همچنین تولید هیدروژن [۱۳] یکی از این بررسی‌هاست. در مطالعه دیگری از روغن سیلیکون به منظور خنک کاری مستقیم سلول خورشیدی متمرکز استفاده شده و از گرمای این روغن برای استفاده در سیستم تولید همزمان بهره برداری شده است [۱۴]. پیشرفت‌های اخیر فناوری باعث ارائه سیستم‌های مبتکرانه تری نیز شده است. در یکی از بررسی‌های اخیر، با استفاده از جدایش طیف‌های نور خورشید در یک سیستم متمرکز ۳۰۰ برابری، محققین ادعا کرده اند که با وجود کنترل دمای سلول خورشیدی در محدوده کمتر از  $110^{\circ}\text{C}$  توانسته اند به بخار با دمای  $248^{\circ}\text{C}$  دست یابند [۱۵].

تجهیزات تبدیل مستقیم انرژی که سلول‌های خورشیدی نیز از آن جمله اند، شامل موارد دیگری نیز می‌شود. سیستم‌های ترموالکتریک که توانایی تبدیل اختلاف دما به جریان الکتریکی (TEG) و همچنین تبدیل جریان الکتریکی به اختلاف دما (TEC) را دارا می‌باشند من جمله تجهیزات تبدیل مستقیم انرژی هستند. قابلیت‌هایی از قبیل اندازه کوچک، عدم وجود قطعه متحرک و ایجاد صدا، سادگی کاربرد و ... باعث مورد توجه قرار گرفتن این تجهیزات شده است. البته بازدهی و ضریب عملکرد پایین نسبت به سیستم‌های متداول تبرید نیز از معایب ترموالکتریک‌ها است. با در نظر گرفتن خصوصیات بیان شده، استفاده از ترموالکتریک‌ها در پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است. نیاز سلول‌های خورشیدی به خنک کاری و قابلیت هندسی و سادگی استفاده ترموالکتریک‌ها باعث شده است در برخی بررسی‌ها، امکان استفاده از خنک کننده‌های ترموالکتریک برای خنک کاری سلول‌های خورشیدی سنجدیده شود [۱۶]. استفاده همزمان از پیل سوختی، ماژول ترموالکتریک و اصلاح کننده بخار نیز یکی از موضوع یکی از بررسی‌های صورت گرفته بوده است. همچنین تولید کننده‌های توان ترموالکتریک در مصارف مرتبط با بازیابی توان اتلافی از سیستم‌های متداول نیز مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۷].

۳ وارد مبادله‌کن گرمایی شده و با آب گرم خروجی از ترمینال گرم خنک کننده ترموالکتریک تبادل گرما انجام می‌دهد. جریان شماره ۴ در واقع آب دریافت شده از شبکه است که گرما ایجاد شده در ترمینال گرم سیستم خنک کننده ترموالکتریک را دریافت کرده و با دمای بالاتری در نقطه ۵ وارد مبادله‌کن گرمایی می‌شود. در این مبادله‌کن نیز مقداری به دمای آب افزوده شده و در نقطه شماره ۶ آب گرم مصرفی خارج می‌گردد. ورودی نقطه شماره ۷ نیز آب شهری با شرایط مشابه نقطه شماره ۴ است که این جریان با عبور از ترمینال سرد خنک کننده ترموالکتریک کاهش دما داشته و در نقطه ۸ به صورت آب سرد مصرفی که در سیستم تبرید استفاده می‌شود، خارج می‌گردد.

بخشی از توان تولیدی سلول خورشیدی متمرکز در خنک کننده ترموالکتریک مصرف شده و مابقی آن به صورت توان الکتریکی به مصرف کننده تحویل داده می‌شود.

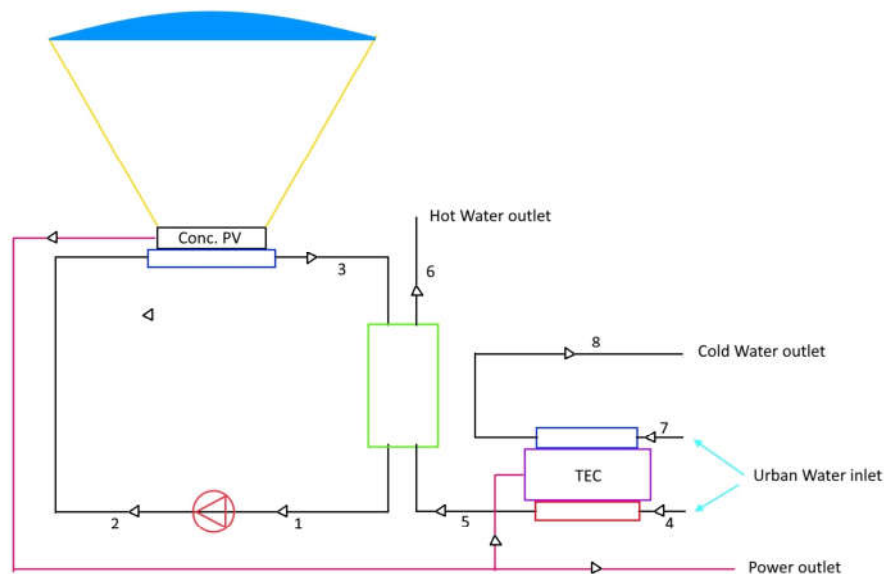
## ۲-۱- خنک کاری سلول‌های خورشیدی متمرکز

به منظور خارج کردن گرما تولید شده به علت جذب تابش خورشیدی در سلول خورشیدی متمرکز و حفظ دمای کاری سلول در محدود مطلوب، باید تجهیزاتی در نظر گرفته شود. به علت شار بالای وارد شده به سلول خورشیدی متمرکز (در حدود ۱۰۰ هزار وات بر مربع) تجهیزات کنترل گرمایی نیز باید قابلیت جذب میزان بالای گرما ایجاد شده از یک سطح کوچک را دارا باشند. به این منظور، از یک مبادله‌کن گرمایی با بدنه‌ای از جنس مس و ابعاد ۳۵ در ۳۵ سانتیمتر استفاده شده است که در داخل آن هشت لوله حاوی جریان آب هر کدام به طول ۳۰ سانتیمتر و قطر ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در باره مدل سازی گرمایی این سیستم در ادامه توضیحاتی ارائه خواهد شد.

با توجه به مطالبی که بیان شد و بررسی منابع تا کنون بررسی سیستمی که با استفاده از سلول‌های خورشیدی متمرکز و همچنین خنک کننده الکتریکی به طور همزمان به تولید توان، گرما و تبرید بپردازد توسط محققین صورت پذیرفته است، بنابراین در پژوهش پیش رو سیستمی ابداعی مورد بررسی قرار گرفته است که هدف آن تولید همزمان توان الکتریکی، سرمایه‌گذاری و گرمایش است. در این سیستم از یک سیستم سلول خورشیدی متمرکز برای تولید توان الکتریکی استفاده شد است. وظیفه خنک کاری سلول خورشیدی بر عهده سیال عاملی است که گرما خود را به جریان آب گذرنده از سمت گرم خنک کننده ترموالکتریک پس می‌دهد. آب گذرنده از سمت گرم ترموالکتریک در دو مرحله که شامل عبور از ترموالکتریک و همچنین تبادل گرما با آب خنک کننده سلول خورشیدی است، گرما دریافت کرده و آب گرم مصرفی را تامین می‌نماید. در سمت سرد خنک کننده ترموالکتریک نیز آب سرد که به منظور تبرید استفاده می‌شود، جریان دارد. توان مصرفی خنک کننده ترموالکتریک توسط بخشی از توان تولیدی سلول خورشیدی تامین می‌گردد. نوآوری سیستم پیشنهادی در واقع ارائه سیستمی کاملاً بر مبنای انرژی خورشیدی است که با کمک گرفتن از سلول خورشیدی متمرکز و همچنین خنک کننده ترموالکتریکی به تولید همزمان توان الکتریکی، گرما و تبرید می‌پردازد.

## ۲- شرح ساختار

با توجه به آنچه بیان شد سیستم پیشنهادی این بررسی در شکل ۱ نمایش داده شده است. جریان آب در نقطه شماره ۱ وارد پمپ شده و فشار آن تا حدی که بر افت فشارهای مبادله‌کن گرمایی غلبه کند افزایش می‌یابد. در نقطه شماره ۲ جریان وارد مبادله‌کن گرمایی در تماس با سلول خورشیدی متمرکز شده و گرما ایجاد شده در سلول خورشیدی متمرکز را دریافت می‌کند. جریان آب دما بالا در نقطه شماره



شکل ۱- طرحواره چرخه پیشنهادی



شکل ۲- مبادله‌کن گرمایی در نظر گرفته شده برای هر واحد سلول خورشیدی متمرکز [۱۸]

همچنین سلول خورشیدی استفاده شده در این بررسی، نمونه تجاری ساخته شده توسط شرکت AZUR SPACE با ابعاد ۱ در ۱ سانتیمتر است که بر روی قطعه ای فلزی به ابعاد ۴ در ۴ سانتیمتر سوار شده است و این قطعه فلزی وظیفه انتقال گرما تولیدی در سلول خورشیدی به مبادله‌کن گرمایی را بر عهده دارد.

### ۲-۲- مدل سازی ریاضی سیستم

با توجه به شدت تابش بالای موجود بر روی سلول‌های خورشیدی متراکم (در حدود ۵۰۰-۱۰۰۰ کیلووات بر مترمربع) نیاز به سیستم خنک کاری با قدرت خنک کاری بالایی است. به این منظور در بررسی پیش رو برای نصب هر کدام از مازول‌های سلول خورشیدی یک قطعه فلزی از جنس مس انتخاب شده است که این قطعه مسی درون خود دارای لوله‌هایی است که آب خنک کن درون آن‌ها جریان دارد. لوله‌های قرار داده شده درون مبادله‌کن گرمایی به قطر ۵ میلی‌متر بوده و طول کلی این لوله‌ها برابر با ۲/۴ متر برای هر مبادله‌کن است. علت استفاده از طول زیاد برای لوله‌های درون مبادله‌کن بالا بردن قابلیت انتقال گرما و جذب گرما سلول خورشیدی متراکم و در نتیجه کنترل دمای سلول خورشیدی است.

در مدل سازی صورت گرفته فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- از تغییرات لحظه‌ای تابش خورشیدی صرف نظر شده و مقدار میانگین لحاظ شده است.
- از مقاومت الکتریکی در مسی‌های انتقال توان صرف نظر شده است.
- از اتلافات گرما و فشار در مسیرهای حرکت سیالات صرف نظر شده است.
- اتلافات گرمای مبادله‌کن گرمایی با محیط ناچیز قلمداد شده است.
- انتقال گرما صورت گرفته در مبادله‌کن گرمایی یک بعدی در نظر گرفته شده است.
- اتلافات گرمای سلول خورشیدی متمرکز از طریق هوای محیط ناچیز فرض شده است.

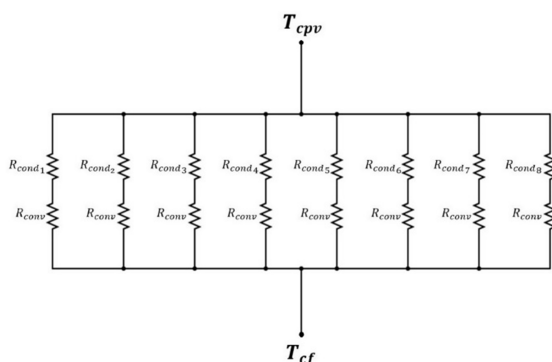
برای به دست آوردن میزان انتقال گرما صورت گرفته از لوله‌ها و همچنین دمای سلول خورشیدی باید ضریب انتقال گرما همرفتی آب درون لوله‌ها محاسبه شده و پس از آن با فرضیات و تقریب‌های قابل قبولی میزان انتقال گرما محاسبه گردد. به این منظور برای محاسبه

ضریب انتقال گرما همرفتی درون لوله‌ها از رابطه (۱) برای عدد ناسلت استفاده شده است [۱۸].

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (1)$$

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^2 \quad (2)$$

این رابطه برای محاسبه عدد ناسلت در محدوده ای که عدد پرانتل بین ۰/۵ تا ۲۰۰۰ و عدد رینولدز بین ۳۰۰۰ تا  $5 \times 10^6$  باشد قابل استفاده است. با محاسبه عدد ناسلت می‌توان ضریب انتقال گرما همرفتی را برای لوله به دست آورد. پس از به دست آوردن ضریب انتقال گرما همرفتی، با توجه به وجود ۸ قطعه لوله درون مبادله‌کن، شبکه مقاومت‌های گرمایی بین جریان آب و سلول خورشیدی متراکم را مانند آنچه در شکل ۳ نمایش داده شده است در نظر گرفت [۱۸]. علت اینکه مقاومت‌های گرمایی رسانشی برای هر قطعه لوله جدا در نظر گرفته شده است، فاصله مختلف این لوله‌ها از سلول خورشیدی است. بنابراین در تعریف مقاومت رسانشی که به صورت  $(L/KA)$  تعریف می‌گردد، باید مقدار مقاومت رسانشی برای هر قطعه لوله به صورت مستقل تعریف شود.



شکل ۳- شبکه مقاومت‌های گرمایی بین سلول خورشیدی متراکم و جریان سیال خنک کننده (۱۸)

با در نظر گرفتن سطح کوچک سلول خورشیدی متراکم در قیاس با سلول‌های متداول، میزان خنک کاری صورت گرفته توسط جریان هوای روی سلول‌های خورشیدی به صورت همرفتی نیز در صورتی که از رابطه (۳) به دست آید [۱۹]، پس از محاسبه مقدار انتقال گرما همرفتی توسط جریان هوا و میزان انتقال گرما توسط مبادله‌کن گرمایی مشخص می‌گردد که از حدود ۶۰ وات گرمای تولید شده در سلول خورشیدی تنها حدود کمتر از ۰/۱ وات می‌تواند توسط انتقال گرما همرفتی جریان هوا دفع گردد و بنابراین دخالت دادن انتقال گرما همرفتی جریان هوا غیر از پیچیده کردن مسئله نفعی نخواهد داشت.

$$h_{conv} = 5.7 + 3.8 v \quad (3)$$

برای مدل سازی خنک کننده ترموالکتریک از روش صفر بعدی [۲۰] کمک گرفته می‌شود. در این روش که برای خنک کننده تک لایه با طول الکترودهای مساوی توسعه یافته است، در صورت استفاده از N

برای محاسبه انتقال گرما صورت گرفته بین سلول خورشیدی و سیال از روش مقاومت‌های گرمایی استفاده می‌شود. در مسیر مبادله گرما بین سلول خورشیدی و سیال سه مقاومت گرمایی کلی وجود دارد که به ترتیب عبارتند از مقاومت تماسی، مقاومت رسانشی درون فلز و مقاومت همرفتی. مقاومت تماسی و همرفتی با استفاده از منابع و همچنین روابطی که بیان شد قابل محاسبه است. در مورد مقاومت رسانشی با توجه به وجود هشت بخش لوله درون مبادله‌کن گرمایی، فاصله هر کدام از این لوله‌ها از سلول خورشیدی متمرکز به طریق هندسی محاسبه شده و همچنین با تقریب قابل قبولی سطح انتقال گرما نیز تخمین زده می‌شود. به این ترتیب هشت مقاومت گرمایی رسانشی به صورت موازی در نظر گرفته شده و برآیند آنها طبق رابطه زیر با دو مقاومت تماسی و همرفتی به دست می‌آید:

$$R_{th-ov} = R_{cont} + \frac{1}{\sum_{i=1}^8 \frac{1}{R_{conv_i} R_{cond_i}}} \quad (10)$$

مقادیر مقاومت گرمایی همرفتی و رسانشی را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

$$R_{conv_i} = \frac{1}{L \pi D h_{conv}} \quad (11)$$

$$R_{cond_i} = \frac{S_i}{K_s A_i} \quad (12)$$

$S_i$  فاصله فضایی بین سلول خورشیدی و لوله مد نظر و  $K_s$  ضریب انتقال گرما فلز مبادله‌کن گرمایی است. پس از ایجاد شبکه مقاومت گرمایی کلی و همچنین محاسبه ضرایب انتقال گرما و میزان شار گرمایی و گرما جذب و تولید شده در سیستم و با برقراری اصل بقای انرژی برای مجموعه سلول خورشیدی و مبادله‌کن متصل به آن می‌توان دماهای سلول خورشیدی و همچنین جریان سیال خنک کننده را به دست آورد.

بقای انرژی در سلول خورشیدی متمرکز را می‌توان به شکل دو رابطه زیر بیان داشت:

$$Q_{cpv_i} = \frac{T_{cpv_i} - T_{cf_i}}{R_{th-ov}} \quad (13)$$

$$Q_{cpv_i} = A_{cpv} N_{cpv} X_c I \lambda (1 - \eta_{cpv_i}) \quad (14)$$

این روابط بیان می‌دارند که گرما انتقال یافته از سلول خورشیدی به سیال خنک کننده برابر با گرما دریافتی از تابش خورشید است. گرما بخشی از انرژی تابشی وارد شده به سلول خورشیدی با در نظر گرفتن بازده سلول خورشیدی به توان الکتریکی تبدیل شده و مابقی آن تبدیل به گرما می‌گردد. بازده سلول خورشیدی متمرکز تابعی از دمای سلول خورشیدی بوده و با هر درجه سلسیوس ۰.۰۶٪ از بازده آن کاسته می‌شود.

لازم به ذکر است دمای میانگین سیال خنک کننده با توجه به ظرفیت بالای گرمای آب و همچنین دبی بالای آب درون لوله‌ها به منظور محاسبه خواص فیزیکی به صورت تقریبی ثابت فرض شده است.

### ۳- شرح نتایج

همانگونه که پیشتر اشاره شد به علت ابعاد کوچک سلول‌های خورشیدی متمرکز در قیاس با سلول‌های خورشیدی متداول، اثر پذیری آن‌ها از متغیرهای محیطی بسیار محدود بوده و در واقع تنها

عدد مازول ترموالکتریک، میزان گرمای گرفته شده در سمت سرد مازول از رابطه (۴) محاسبه خواهد شد:

$$Q_c = N \left[ (\alpha_p - \alpha_n) A T_c - 0.5 A^2 \lambda (\rho_p - \rho_n) - \frac{(k_p - k_n)(T_H - T_C)}{\lambda} \right] \quad (4)$$

و همچنین میزان توان مصرف شده در مازول را می‌توان از رابطه (۵) محاسبه کرد:

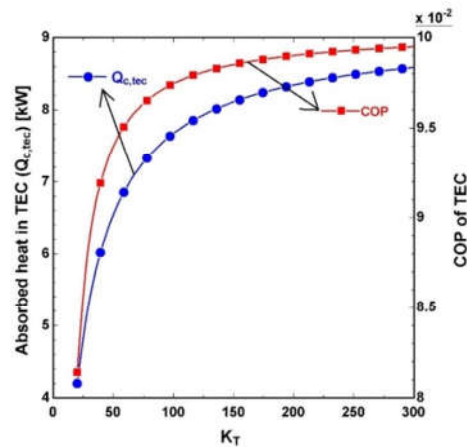
$$W_{ts} = N [(\alpha_p - \alpha_n)(T_H - T_C) + A \lambda (\rho_p - \rho_n)] A \quad (5)$$

با فرض  $k_p = -k_n$  و  $\rho_p = -\rho_n$ ،  $\alpha_p = -\alpha_n$ ، روابط (۴) و (۵) به شکل زیر درمی‌آیند:

$$Q_c = 2N \left[ (\alpha) A T_c - 0.5 A^2 \lambda \rho - \frac{k(T_H - T_C)}{\lambda} \right] \quad (6)$$

$$W_{ts} = 2N [\alpha(T_H - T_C) + A \lambda \rho] A \quad (7)$$

به منظور صحت سنجی مدل ایجاد شده برای خنک کننده ترموالکتریک، نتایج مدل مذکور برای نمونه ارائه شده در یک بررسی دیگر [۲۱] اعمال شده و نتایج به دست آمده از مدل برای ضریب عملکرد خنک کننده ترموالکتریک و همچنین میزان گرمای دریافتی در سمت سرد، با نتایج ارائه شده در بررسی پیشین مقایسه شده است که همانگونه که در مشاهده می‌گردد نتایج به دست آمده دقت قابل قبولی دارند.



شکل ۲-۴ تغییرات ضریب عملکرد و گرمای دریافتی در بخش سرد خنک کننده ترموالکتریک با تغییرات ضریب انتقال گرما در اتصالات

به منظور مدل سازی سیستم سلول خورشیدی متمرکز و همچنین انتقال گرما صورت گرفته از آن، ضریب انتقال گرما همرفت درون لوله از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$h_{conv} = 0.023 \left[ \frac{G(1-x)D}{\mu_l} \right]^{0.8} Fr_l^{0.4} \frac{K_l}{D} \quad (8)$$

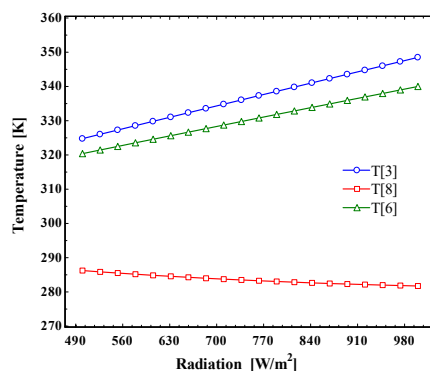
در این رابطه  $G$  دبی جرمی در واحد سطح،  $x$  کسر جرمی بخار،  $D$  قطر لوله،  $\mu_l$  لزجت دینامیکی و  $Fr$  عدد فرود است که می‌تواند با استفاده از رابطه زیر به دست آید:

$$Fr_l = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D} \quad (9)$$

عامل محیطی که در کارکرد سلول‌های خورشیدی متمرکز تاثیرگذار است میزان شدت تابش خورشیدی است.

شدت تابش خورشیدی در واقع میزان انرژی محرکه سیستم که وارد آن می‌شود را مشخص می‌کند. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، هر چه میزان شدت تابش خورشیدی بیشتر شود، عملکرد سیستم بهتر می‌گردد. معنای بهبود عملکرد سیستم این است که دمای جریان هوای گرم خروجی بیشتر شده و دمای جریان هوای سرد خروجی کاهش پیدا می‌کند و در واقع سیستم گرمایش و سرمایش بیشتری را انجام می‌دهد. جریان شماره ۸ بیانگر دمای خروجی سرد سیستم و جریان شماره ۶ بیانگر خروجی گرم سیستم است. جریان شماره ۳ که همواره بالاترین دمای موجود در این چرخه را خواهد داشت، در واقع دمای خروجی آب خنک کن سلول‌های خورشیدی متراکم است.

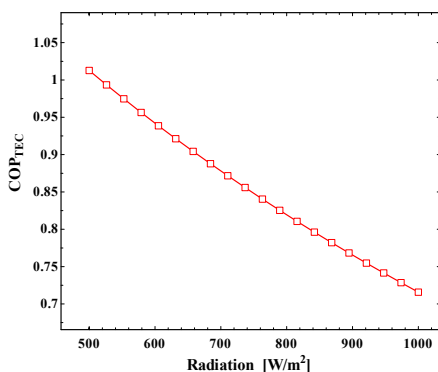
نکته دیگری که در این تغییرات جلب توجه می‌نماید، حساسیت بیشتر دمای آب گرم خروجی به تابش خورشیدی نسبت به دمای آب سرد خروجی است. علت این امر را می‌توان در بازده کمتر تبدیل انرژی و در واقع ضریب عملکرد کمتر مازول ترموالکتریک جست. در تابش‌های بالا، گرمای بیشتر به سلول خورشیدی وارد شده و در نتیجه گرمای بیشتری به آب گرم منتقل می‌گردد. در سوی دیگر تابش بالاتر به معنی تولید توان بیشتری در سلول خورشیدی است که بالطبع توان بیشتری نیز به خنک کننده ترموالکتریک می‌رسد. اما خنک کننده ترموالکتریک به علت کارایی پایینی که دارد میزان کمی از این توان را می‌تواند تبدیل به سرمایش کرده و در نتیجه حساسیت دمای سرد خروجی به تابش پایین است. با افزایش دو برابری تابش (از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ وات بر متر مربع) میزان دمای آب گرم خروجی ۲۰ درجه بیشتر و میزان دمای آب سرد خروجی در حدود ۵ درجه کمتر می‌شود.



شکل ۵- تغییرات دماهای خروجی خنک کننده سلول خورشیدی (۳)، خروجی گرم (۶) و خروجی سرد (۸) با تغییرات تابش

خنک کننده‌های ترموالکتریک بهترین ضریب عملکرد خود را زمانی نشان می‌دهند که اختلاف دمای سمت گرم و سرد آن‌ها بسیار پایین باشد. و با بالا رفتن توان ورودی و در نتیجه بالا رفتن اختلاف دمای سمت گرم و سرد ضریب عملکردشان به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد با دو برابر شدن شدت تابش از ۵۰۰ وات بر متر مربع به ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، ضریب عملکرد خنک کننده ترموالکتریک در حدود ۳۰٪ افت داشته است. این

افت نیز یکی از دلایل تاثیر کم مقدار تابش‌های بالا بر روی دمای سرد خروجی است.

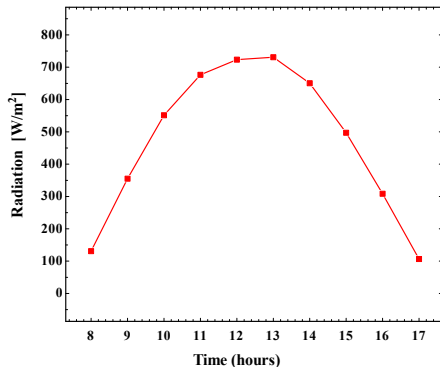


شکل ۶- تغییرات ضریب عملکرد خنک کننده ترموالکتریک با تغییرات تابش

تابش خورشیدی بالاتر به مفهوم توان تولیدی بیشتر در سلول خورشیدی است. اما در نقطه مقابل تابش شدیدتر باعث بالاتر رفتن دمای سلول خورشیدی می‌شود. دماهای بالا در سلول خورشیدی به معنی کاهش بازدهی این سلول‌ها در تبدیل انرژی تابشی به انرژی الکتریکی است. خوشبختانه یکی از مزایای مهم استفاده از سلول‌های خورشیدی متراکم تاثیر پذیری بسیار اندک آنها از دماهای بالا در مقایسه با سلول‌های خورشیدی متداول است. در واقع به علت استفاده از مواد گران قیمت و طراحی بهتر سلول‌های خورشیدی متراکم میزان افت بازده آن‌ها در برابر افزایش دما کمتر از یک دهم افت بازده سلول‌های خورشیدی متداول است. علاوه بر این، با توجه به استفاده از سیستم خنک کاری پر قدرت برای این سلول‌های خورشیدی، افزایش تابش خورشیدی نمی‌تواند دمای سلول خورشیدی را به میزان زیادی بالا ببرد و با افزایش تابش از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر متر مربع بازده سلول خورشیدی تنها در حدود ۱٪ افت پیدا میکند. این امر باعث می‌شود که توان تولیدی با شدت تابش خورشیدی تقریباً رابطه ای خطی داشته باشد و با دو برابر شدن تابش میزان توان تولیدی نیز دو برابر گردد. اما باید توجه داشت که افزایش تابش نیاز به توان سرمایشی سلول‌های خورشیدی را نیز افزایش می‌دهد. با افزایش تابش از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ وات بر متر مربع میزان توان سرمایشی مورد نیاز برای خنک کاری سلول‌های خورشیدی از حدود ۳۳ کیلووات به حدود ۶۸ کیلووات افزایش می‌یابد. این موضوعات در شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

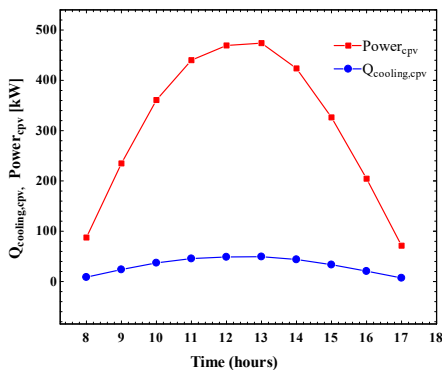
با توجه به ماهیت متغیر تابش خورشیدی، به نظر می‌رسد بررسی صورت گرفته حتما باید شامل مطالعه اثرات تغییرات میزان تابش خورشیدی در ساعات مختلف و رفتار سیستم در این تابش‌ها باشد. به این منظور، شرایط تابش میانگین که توسط پژوهش دیمری و همکاران [۱۹] برای تاریخ دوم سپتامبر ۱۹۸۹ گزارش شده است (شکل ۸) به عنوان یک نمونه از تغییرات تابش در طول روز لحاظ می‌گردد و رفتار سیستم با این تغییرات تابش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در تابش‌های مختلف در طی ساعات روز، میزان توان تولیدی سیستم تغییر خواهد کرد و باید این مسئله برای در نظر گرفتن سیستم ذخیره سازی مناسب و یا تزریق به شبکه مصرف مورد توجه قرار گیرد.

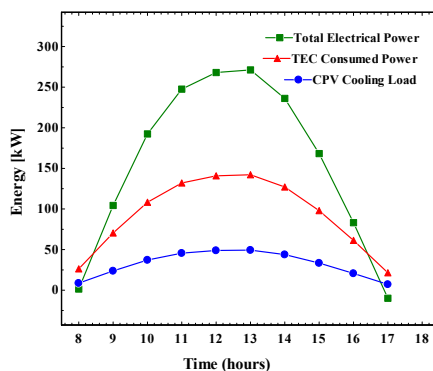


شکل ۸- تغییرات تابش در طول ساعات روز به طور میانگین در ۲ سپتامبر ۱۹۸۹ [۱۹]

همانطور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، با افزایش توان ورودی به خنک کننده ترموالکتریک، اختلاف دمای دو سر آن افزایش یافته و در نتیجه ضریب عملکردش کاهش پیدا میکند. این موضوع را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد که در ساعات میانی روز که تابش مقدار بالاتری دارد، توان جذب شده توسط خنک کننده ترموالکتریک بالا بوده و ضریب عملکرد آن مقدار کمتری را دارا می‌باشد.

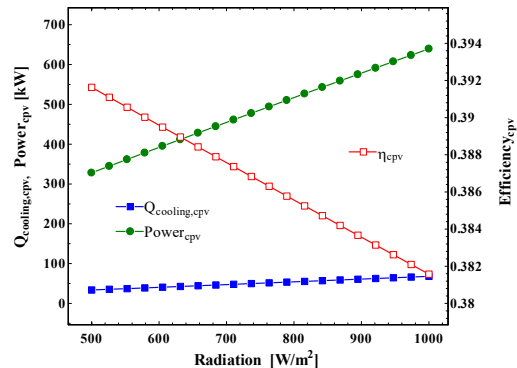


شکل ۹- توان تولیدی سلول خورشیدی و همچنین بار تبرید مورد نیاز برای خنک کاری در ساعات مختلف روز



شکل ۱۰- کل توان تولیدی، توان مصرفی خنک کننده ترموالکتریک و بار تبرید مورد نیاز سلول خورشیدی در ساعات مختلف روز

همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، با تغییرات تابش از ساعت ۸ صبح تا ۱۷ بعد از ظهر میزان توان تولیدی به شدت تغییر پیدا میکند. به عنوان مثال میزان توان تولیدی توسط سلول خورشیدی در ساعت ۸ صبح کمتر از ۱۰۰ کیلووات است که این مقدار در ساعت ۱۳ به حدود ۵۰۰ کیلووات می‌رسد. در صورتی که توان الکتریکی تولیدی سیستم برای مصارف مستقیم در نظر گرفته شده باشد، باید کمبود و یا مازاد توان تولیدی را به نحوی مدیریت کرد که موجب آسیب به سیستم نگردد.

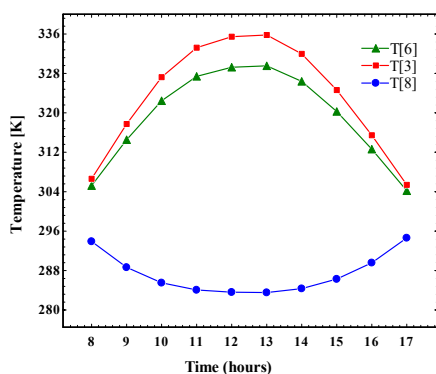


شکل ۷- تغییرات توان تولیدی سلول خورشیدی، بار سرمایی خنک کاری سلول خورشیدی و بازده سلول خورشیدی با تغییرات تابش

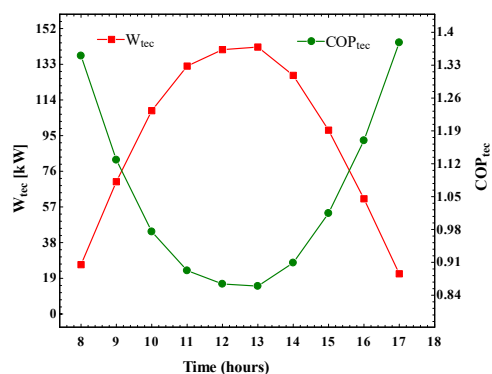
در این سیستم فرض شده است که همواره ۳۰٪ از توان الکتریکی تولیدی توسط سلول‌های خورشیدی به خنک کننده ترموالکتریک انتقال یابد. بنابراین با بالا رفتن میزان تابش در ساعات میانی روز، میزان توان اختصاصی به خنک کننده ترموالکتریک نیز افزایش یافته و در نتیجه دمای آب سرد خروجی کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). در صورتی که سیستم به گونه ای طراحی گردد که دمای جریان سرد خروجی ثابت لحاظ شود در آن صورت توان جذب شده توسط خنک کننده ترموالکتریک ثابت بوده و در نتیجه توان خالص خروجی از سیستم مقدار بیشتری خواهد داشت. دما، فشار و آنتالپی نقاط مختلف چرخه برای شرایط کاری تابش ثابت  $1000 \text{ W/m}^2$  در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات سیال کاری در نقاط مختلف چرخه

شماره	دما (K)	فشار (kPa)	آنتالپی (kJ/kg.K)
۱	۳۴۱/۸	۹۹/۲۸	۲۷۸/۳
۲	۳۴۲	۱۱۰	۲۸۸/۵
۳	۳۴۸/۵	۱۰۴/۵	۳۱۵/۷
۴	۲۹۸/۲	۱۱۰	۱۰۴/۹
۵	۳۰۶	۱۰۴/۵	۱۳۷/۸
۶	۳۴۰	۹۹/۲۸	۲۸۰
۷	۲۹۸/۲	۱۱۰	۱۰۴/۹
۸	۲۸۱/۸	۱۰۴/۵	۳۶/۳



شکل ۱۰- دمای آب خنک کننده سلول خورشیدی (۳)، خروجی گرم (۶) و خروجی سرد (۸) در ساعات مختلف روز



شکل ۱۱- توان مصرفی خنک کننده ترموالکتریک و همچنین ضریب عملکرد آن در ساعات مختلف روز

#### ۴- جمع بندی

ارائه، شبیه سازی و بررسی سیستم تولید سه گانه توان، گرما و تبرید بر پایه خنک کننده ترموالکتریک و سلول‌های خورشیدی متمرکز در این بررسی صورت گرفته است. سلول خورشیدی متمرکز به سبب استفاده از تجهیزات متمرکز کننده تابش مانند آینه و یا عدسی‌های خاص، شار تابشی بسیار بالاتری را نسبت به نمونه‌های متداول دریافت می‌کند. این امر باعث در دسترس بودن منابع گرما در دمای بالاتر برای سیستم است. مجموعه خنک کننده‌های ترموالکتریک با جذب ۳۰٪ توان تولیدی سلول‌های خورشیدی متمرکز خنک کاری بخشی از آب ورودی سیستم را برای استفاده در مصارف تبرید انجام می‌دهند. بخش دیگری از آب ورودی با جذب گرمای سمت گرم خنک کننده ترموالکتریک در مرحله اول و تبادل گرما با آب خنک کننده سلول خورشیدی متمرکز در مرحله دوم آب گرم مصرفی را تامین می‌نماید.

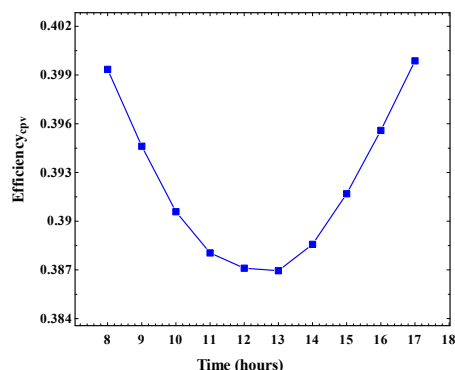
سیستم پیشنهادی قابلیت این را دارد که آب گرم مصرفی در حدود حداکثر ۵۰ درجه سلسیوس، آب سرد مصرفی با دمای حداقل ۱۰ درجه سلسیوس و همچنین ۲۷۰ کیلووات توان الکتریکی تولید نماید. قابل ذکر است این امر با استفاده از ۲ مترمربع سلول خورشیدی متمرکز که به صورت سلول‌های منفرد ۱×۱ سانتی متر به کار گرفته می‌شوند صورت می‌پذیرد. بررسی پارامتری سیستم نشان دهنده آن است که افزایش شدت تابش همواره باعث افزایش توان تولیدی و دمای آب گرم خروجی و همچنین کاهش دمای آب سرد خروجی می‌گردد. با این وجود به علت کاهش ضریب عملکرد خنک کننده ترموالکتریک در اختلاف دماهای بالا، تاثیر افزایش تابش بر روی دمای سرد خروجی ناچیز خواهد بود و در واقع دمای آب سرد خروجی حساسیت کمتری به شدت تابش را دارا می‌باشد. شبیه سازی سیستم برای تابش در ساعات مختلف روز نیز نشان دهنده آن است که در ساعات اوج تابش خورشید که نیاز به انرژی و سرمایه‌ش به حداکثر می‌رسد، سیستم نیز به حداکثر توان و تبرید خود می‌رسد.

#### ۵- مراجع

- [1] Gholizadeh T., M. Vajdi and Rostamzadeh H., A new trigeneration system for power, cooling, and freshwater production driven by a flash-binary geothermal heat source. *Renewable Energy*, 148: p. 31-43. 2020

بازده سلول‌های خورشیدی نیز در تابش‌های بالاتر به علت بالا رفتن دمای آنها قدری کاهش پیدا می‌کند. بازده سلول‌های خورشیدی متراکم در قیاس با سلول‌های خورشیدی متداول مقدار مطلق بسیار بالاتری دارد. بازده سلول‌های خورشیدی معمولی که به صورت تجاری استفاده گسترده‌ای دارند در دمای استاندارد در حدود ۲۵ درجه به ندرت تا ۱۵٪ می‌رسد. و این بازده با بالا رفتن دما می‌تواند حتی تا مقدار زیر ۱۰٪ نیز افت کند که توان تولیدی بسیار پایین و در نتیجه هزینه اولیه بسیار زیادی را می‌طلبد. اما میزان بازده در سلول‌های خورشیدی متراکم تجاری شده مقداری در حدود ۴۰٪ دارد که این مقدار به ازای هر درجه افزایش دما به میزان ۰/۰۴۵ درصد کاهش می‌یابد. در واقع در ساعات میانی روز بازده کمتر از ۲٪ کاهش نسبت به ساعات ابتدایی و انتهایی روز دارد (شکل ۱۲).

به عنوان دو مورد از سه مورد خروجی سیستم پیشنهادی، دمای جریان گرم و جریان سرد برای ما در ساعات مختلف روز باید معین باشند. تغییرات دمای این جریان‌ها در ساعات مختلف روز در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. جریان شماره ۶ نمایانگر جریان گرم و جریان شماره ۸ نمایانگر جریان سرد خروجی از سیستم است. همانطور که مشاهده می‌گردد جریان خروجی گرم سیستم در بیشترین میزان تابش به حدود ۳۲۹ کلوین و یا حدود ۵۵ درجه سلسیوس و جریان خروجی سرد سیستم به حدود ۲۸۳،۵ کلوین و یا حدود ۱۰ درجه سلسیوس می‌رسد. در ساعات میانی روز میزان اختلاف دمای سرد و گرم خروجی از سیستم تا حدود ۴۵ کلوین است که این اختلاف در ساعات کم تابش مانند ابتدا و انتهای روز به مقدار کمتر از ۱۰ کلوین کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- بازده سلول‌های خورشیدی در ساعات مختلف روز



- [22] Shah M.M. and MM S., A new correlation for heat transfer during boiling flow through pipes. 1976.
- [2] Li Z., et al., Comprehensive evaluation of low-grade solar trigeneration system by photovoltaic-thermal collectors. *Energy Conversion and Management*, 215: p. 112895. 2020
- [3] Rostami S., Rostamzadeh H. and Fatehi R., A new wind turbine driven trigeneration system applicable for humid and windy areas, working with various nanofluids. *Journal of Cleaner Production*, 296: p. 126579. 2021
- [4] Bellos E. and Tzivanidis C., Parametric analysis of a solar-driven trigeneration system with an organic Rankine cycle and a vapor compression cycle. *Energy and Built Environment*, 2(3): p. 278-289. 2021
- [5] Chen H., Li Z. and Xu Y., Assessment and parametric analysis of solar trigeneration system integrating photovoltaic thermal collectors with thermal energy storage under time-of-use electricity pricing. *Solar Energy*, 206: p. 875-899. 2020
- [6] Sebastián, A., et al., Modular micro-trigeneration system for a novel rotatory solar Fresnel collector: A design space analysis. *Energy Conversion and Management*, 227: p. 113599. 2021
- [7] Dabwan, Y.N. and G. Pei, A novel integrated solar gas turbine trigeneration system for production of power, heat and cooling: Thermodynamic-economic-environmental analysis. *Renewable Energy*, 152: p. 925-941. 2020
- [8] Adhami H., Designing and analysis of the micro-trigeneration systems based on combined proton exchange membrane fuel cell with photovoltaic and photovoltaic/thermal prime movers in portable applications. *Applied Thermal Engineering*, 180: p. 115779. 2020
- [9] Chen H., Li Z. and Xu Y., Evaluation and comparison of solar trigeneration systems based on photovoltaic thermal collectors for subtropical climates. *Energy Conversion and Management*, 199: p. 111959. 2019
- [10] Maka, A.O.M. and T.S. O'Donovan, Transient thermal-electrical performance modelling of solar concentrating photovoltaic (CPV) receiver. *Solar Energy*, 211: p. 897-907. 2020
- [11] AZURSPACE. CPV Solar Cells. 2021; Available from: <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>.
- [12] Ben Youssef, W., et al., Assessment viability of a concentrating photovoltaic/thermal-energy cogeneration system (CPV/T) with storage for a textile industry application. *Solar Energy*, 159: p. 841-851. 2018
- [13] Khan, S.A., Y. Bicer, and M. Koç, Design and analysis of a multigeneration system with concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5): p. 3484-3498. 2020
- [14] Ji Y., et al., A transmissive concentrator photovoltaic module with cells directly cooled by silicone oil for solar cogeneration systems. *Applied Energy*, 288: p. 116622. 2021
- [15] Codd D.S., et al., Solar Cogeneration of Electricity with High-Temperature Process Heat. *Cell Reports Physical Science*, 1(8): p. 100135. 2020
- [16] Dimri, N., A. Tiwari, and G.N. Tiwari, Effect of thermoelectric cooler (TEC) integrated at the base of opaque photovoltaic (PV) module to enhance an overall electrical efficiency. *Solar Energy*, 166: p. 159-170. 2018
- [17] Jaber H., et al., Domestic thermoelectric cogeneration system optimization analysis, energy consumption and CO2 emissions reduction. *Applied Thermal Engineering*, 130: p. 279-295. 2018
- [18] Jamali S. and Yari M., Recovery of liquefied natural gas cold energy in a clean cogeneration system utilizing concentrated photovoltaics. *Journal of Cleaner Production*, 350: p. 131517. 2022
- [19] Dimri N., A. Tiwari, and G.N. Tiwari, Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector. *Energy Conversion and Management*, 146: p. 68-77. 2017
- [20] Sarkar J., Performance optimization of transcritical CO2 refrigeration cycle with thermoelectric subcooler. *International Journal of Energy Research*, 37(2): p. 121-128. 2013
- [21] Sarkar J. and Bhattacharyya S., Optimization of recompression S-CO2 power cycle with reheating. *Energy Conversion and Management*, 50(8): p. 1939-1945. 2009