

تحلیل ترمودینامیکی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز تغذیه شده با متانول و با بهره‌گیری از سیستم خورشیدی

علی صابری مهر* استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران، a.s.mehr@bonabu.ac.ir
وحید فرهنگ مهر استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران، vfarhangmehr@gmail.com

چکیده

متانول به عنوان یک سوخت جایگزین، به دلیل آلودگی کم و هزینه حمل و نقل پایین بی‌نظیر است که می‌تواند با عملکرد کاتالیزورها در دمای $250-300^{\circ}\text{C}$ به گاز سنتزی تجزیه شود. استفاده از این سوخت پس از سنتز در پیل سوختی اکسید جامد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است، می‌تواند ویژگی‌های منحصر به فردی داشته باشد. در کار حاضر، در قالب یک سیستم تولید سه‌گانه برق، سرمایش و گرمایش با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، متانول ابتدا سنتز شده و به گازهای مورد استفاده در پیل سوختی اکسید جامد تبدیل می‌شود. سیستم پیل سوختی که در واقع برای افزایش تولید توان آن با یک سیستم توربین گازی ترکیب شده است، علاوه بر تولید برق، گرمای لازم برای تولید سرمایش در یک چیلر جذبی را فراهم می‌کند. نتایج تحلیل انرژی و انرژی سیستم پیشنهادی نشان داد که با کنترل دبی جریان متانول و دما، راندمان تبدیل به بالای ۶۰٪ می‌رسد. طبق نتایج تحلیل انرژی، تلفات برگشت‌ناپذیر نور به گرما و تلفات گرما در واکنش تجزیه خورشیدی متانول در حدود ۱۳٪ از کل انرژی ورودی را تشکیل می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، متانول، انرژی، سیستم خورشیدی، انرژی تجدیدپذیر، تحلیل ترمودینامیکی.

Thermodynamic Analysis of a Combined System of Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Fed by Methanol and Using a Solar System

A. Saberi-Mehr
V. Farhangmehr

Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran
 Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Abstract

Methanol is unique as an alternative fuel due to its low pollution and transportation costs, which can be decomposed into synthetic gas by operating catalysts at $250-300^{\circ}\text{C}$. The use of this fuel after synthesis in solid oxide fuel cell, which has been considered by researchers in recent years, can have unique properties. In the present work, in the form of a triple system of power generation, cooling, and heating using solar energy, methanol is first synthesized and converted into gases used in solid oxide fuel cell. The fuel cell system, which is actually combined with a gas turbine system to increase power generation, in addition to generating power, provides the heat needed to generate cooling in an absorption chiller. The results of energy and exergy analysis of the proposed system showed that by controlling the methanol flow rate and temperature, the conversion efficiency reaches over 60%. According to the results of exergy analysis, the irreversible losses of light to heat and heat losses in the solar decomposition reaction of methanol make up about 13% of the total input exergy.

Keywords: Solid-oxide fuel cell, Methanol, Exergy, Solar system, Renewable energy, Thermodynamic analysis.

متوسط یا پایین با استفاده از گردآورهای خورشیدی سهموی برای جمع‌آوری گرما در مقایسه با فرآیندهای دما بالا گزینه‌ای امیدوارکننده است [2].

متانول به عنوان یک سوخت جایگزین برای سوخت‌های فسیلی، به دلیل آلودگی کمتر و هزینه حمل و نقل پایین‌تر بی‌نظیر است [3] که می‌تواند با عملکرد کاتالیزورها در دمای $250-300^{\circ}\text{C}$ به گاز سنتزی تجزیه شود و گرمای لازم برای واکنش می‌تواند از طریق انرژی گرمایی خورشیدی تأمین شود. ژو و همکاران پیل‌های فتوولتایی و تجزیه متانول را جهت دستیابی به طیف کامل استفاده از انرژی-خورشیدی یکپارچه‌سازی کردند و راندمان تولید توان الکتریکی سیستم را از ۳۵٪ بالا بردند [4]. بانی و لیو یک سیستم انرژی توزیع شده دما متوسط و پایین تجهیز شده با گردآورهای خورشیدی سهموی را توسعه دادند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی آنها نشان داد که راندمان انرژی و انرژی سیستم در شرایط طراحی می‌تواند به ۸۲٪ و ۵۸/۷۲٪ برسد [5]. لیو و همکاران سیستمی برای تولید توان الکتریکی پراکنده با استفاده از یک سوخت پاک هیبریدی خورشیدی ارائه دادند که در آن، انرژی خورشیدی واکنش تجزیه متانول را هدایت می‌کرد [6]. طی این واکنش شیمیایی، انرژی خورشیدی به سوخت پاک خورشیدی تغییر

۱- مقدمه

به دلیل افزایش جهانی آلودگی هوا و کاهش جهانی منابع سوخت-های فسیلی، انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر راه‌حلی برای آلودگی محیط زیست و بحران انرژی است. منبع فراوان انرژی خورشیدی گزینه امیدوارکننده‌ای برای کاهش انتشار کربن در فرآیندهای تبدیل انرژی است. شیمی گرمای خورشیدی^۱ روشی موثر در استفاده بهینه از انرژی خورشیدی و نیز ارتقای انرژی خورشیدی به سوخت‌های هیدروکربنی توسط یک فرآیند واکنش ترموشیمیایی، مانند اصلاح^۲ گاز طبیعی، گازی کردن^۳ زیست‌توده و نیز جداسازی^۴ آب-دی‌اکسید کربن، می‌باشد [1]. با این حال، دمای کاری بالا باعث افزایش مشکلات فنی، پیچیدگی سیستم و کاهش ارزش اقتصادی سیستم به دلیل تلفات گرمایی تابشی بالا خواهد شد. تبدیل ترموشیمیایی خورشیدی در دمای

¹ Solar thermal chemistry

² Reforming

³ Gasification

⁴ Splitting

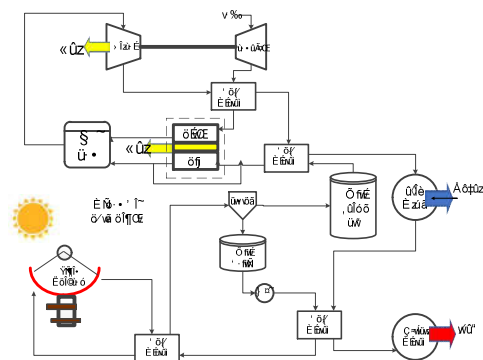
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.s.mehr@bonabu.ac.ir

۲- مشخصات ساختاری سیستم

با توجه به راندمان پایین در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، یک سیستم جدید پیشنهاد می‌شود تا عملکرد را با یکپارچه‌سازی فرآیند شیمی‌گرماي خورشیدی و پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی بهبود بخشد. از شیمی‌گرماي خورشیدی دما متوسط و پایین برای تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی با چگالی انرژی بیشتر و درجه بالاتر استفاده می‌شود. گرما و تلفات برگشت‌ناپذیر در فرآیند تمرکز خورشیدی به خاطر دمای پایین‌تر و تراز انرژی بالاتر کاهش داده می‌شوند. انرژی شیمیایی که توسط پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، ممکن است محدودیت‌های چرخه‌های توان الکتریکی را شکسته و باعث بهبود راندمان انرژی شود. گرماي اتلافي بازیافت شده می‌تواند استفاده آبخاری انرژی را حاصل کند.

۲-۱- توصیف سیستم

در این سیستم جدید سه قسمت وجود دارد: یک زیرسیستم تجزیه گرماي خورشیدی متانول، یک نیروگاه پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی و یک زیرسیستم استفاده از گرماي اتلافي. در شکل ۱، دیگرام جریان و اجزای اصلی این سیستم نشان داده شده است. مشخصه‌های این سیستم جدید را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:



شکل ۱- طرحواره سیستم پیشنهادی

(۱) فرآیند شیمی‌گرماي خورشیدی دما متوسط و پایین. در این فرآیند، ابتدا متانول بخار شده و سپس به درون گیرنده‌ها/راکتورهای خورشیدی جهت شرکت در واکنش تولید گاز سنتزی جریان می‌یابد. گرماي مورد نیاز برای واکنش گرماگیر توسط گردآور خورشیدی تامین می‌شود. از طریق یکپارچه‌سازی تجزیه گرماي خورشیدی متانول بر پایه شیمی‌گرماي خورشیدی، انرژی خورشیدی به گاز سنتزی با تراز انرژی بالا ارتقاء می‌یابد که به افزایش راندمان ترمودینامیکی سیستم می‌انجامد. انرژی خورشیدی به شکل سوخت پاک خورشیدی به‌طور پیوسته درون مخزن گاز ذخیره می‌شود. دبی جریان با توجه به بارها قابل تنظیم است. قبل از ورود به مخزن گاز، سوخت پاک خورشیدی دما بالای جریان‌یافته از گیرنده‌ها/راکتورهای خورشیدی با متانول مایع سرد می‌شود و همزمان متانول مایع با تبادل گرما پیش‌گرم می‌شود. متانول واکنش‌نیافته توسط یک جداکننده مایع-گاز از گاز سنتزی سرد شده جدا شده و به یک مخزن ذخیره متانول برگشت داده می‌شود و گاز سنتزی تولید شده به درون یک مخزن ذخیره گاز جریان می‌یابد.

(۲) پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی در سیستم. پس از پیش‌گرمایش، گاز سنتزی وارد آند پیل سوختی شده و هوا نیز پس از فشرده‌سازی و پیش‌گرمایش وارد کاتد پیل سوختی می‌شود. سوخت واکنش نیافته در پیل سوختی اکسید جامد جهت احتراق وارد پس‌سوز می‌شود و گاز دما بالا و فشار بالای تولید شده میکروتوربین گازی را وادار به کار می‌کند.

(۳) استفاده از گرماي اتلافي. ابتدا، خروجی میکروتوربین گازی هوای فشرده شده توسط کمپرسور و گاز سنتزی جریان یافته از مخزن گاز را گرم می‌کند. سپس خروجی از چیلر جذبی لیتیوم-بروماید جهت بهبود ظرفیت سرمایش عبور کرده و متانول را پیش‌گرم نموده و گرما را خارج می‌کند. پارامترهای اصلی سیستم جدید در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی [20,21]

مقادیر	پارامتر
۲۵	دمای محیط (°C)
۷۰۰	تابش مستقیم طبیعی (W/m ²)
۳	فشار عملیاتی واحد شیمی‌گرماي خورشیدی (bar)

ضریب عملکرد چیلر	۱/۲۵
جریان گاز خروجی (kg/s)	۱/۲۶
دمای ورودی میرد جذبی لیتیوم-بروماید (°C)	۲۷۱
دمای خروجی میرد جذبی لیتیوم-بروماید (°C)	۱۷۰
دمای ورودی آب سرد شده (°C)	۱۲
دمای ورودی آب سرد شده (°C)	۷

۲-۲- شیمی گرمای خورشیدی

در فرآیند شیمی گرمای خورشیدی از گردآورهای خورشیدی سه‌موی و گیرنده‌ها/راکتورها بهره گرفته می‌شود. گردآورها نور خورشید را جهت تامین انرژی لازم برای شیمی گرمای خورشیدی بر روی گیرنده‌ها/راکتورها متمرکز می‌کنند. گیرنده/راکتور شیمی گرمای خورشیدی شامل یک لوله جذبی که درون یک پوشش شیشه‌ای قرار می‌گیرد، است. جنس لوله جذبی از استیل ضد زنگ پوشش داده شده با یک پوشش انتخابی است. با افزایش جذب تابش خورشیدی، پوشش انتخابی می‌تواند انتشار طیف موج را کاهش داده و راندمان جذب گرما را بهبود بخشد. ذرات کاتالیزور شامل $Al_2O_3/ZnO/Cu$ درون لوله جذبی طوری مرتب می‌شوند که خط کانونی گردآورها را مشخص کنند. فضای بین محفظه شیشه‌ای و لوله جذبی برای کاهش تلفات گرما خلاء می‌باشد. متانول واکنش دهنده در سطح کاتالیزور جریان می‌یابد تا باعث تولید گاز سنتزی شود و گرمای این کار توسط انرژی گرمایی خورشیدی تامین می‌گردد. آرایش میدان آینه از پنج ردیف تشکیل شده که هر ردیف آن طولی به اندازه ۱۲m دارد. جدول ۲ پارامترهای طراحی واحد شیمی گرمای خورشیدی را نشان می‌دهد. واکنش زیر در راکتور رخ می‌دهد:



فرآیند واکنش، گرما را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کند و انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی تراز بالا که استفاده و ذخیره آن راحت‌تر است، تبدیل می‌شود. گاز سنتزی تولید شده با تجزیه گرمایی - خورشیدی متانول، به دلیل محتوای هیدروژن بالا در گاز سنتزی می‌تواند به طور مستقیم در نیروگاه پیل سوختی اکسید جامد- میکروتوربین گازی به‌کار گرفته شود. با تمرکز روی بارها و تابش‌های تغییرپذیر خورشیدی می‌توان با استفاده از ذخیره و آزادسازی گاز سنتزی، سیستم را پایدار نگه داشت. زمانی که نور خورشید به حد کافی وجود داشته باشد، گاز سنتزی تولید شده توسط شیمی گرمای خورشیدی می‌تواند بارهای مصرفی را برآورده کرده و مقدار اضافی آن ذخیره شود. زمانی که نور خورشید به حد کافی موجود نیست و سوخت تولید شده نمی‌تواند بارهای مصرفی را برآورده کند، گاز سنتزی ذخیره شده در مخزن گاز آزاد می‌شود. با ذخیره انرژی، سیستم پیشنهاد شده قابلیت آن را دارد که در تابش‌های خورشیدی مختلف، بارهای مصرفی را برآورده کند.

جدول ۲- پارامترهای واحد شیمی گرمای خورشیدی [20]

پارامترها	مقادیر
مساحت گردآور خورشیدی (m^2)	۳۴۵/۶
پهنای روزنه گردآور خورشیدی (m)	۵/۷۶
طول گیرنده/راکتور (m)	۴
حلقه‌های گردآور	۵
چگالی توده‌ای کاتالیزور (kg/L)	۱/۱۵

ابعاد اسمی کاتالیزور (mm)	$5 \times 5 \Phi$
راندمان بهینه طراحی	۰/۷۴

۲-۳- واحد پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی

گاز سنتزی تولید شده در بخش آند پیل سوختی اکسید جامد استفاده می‌شود. هوا توسط یک کمپرسور فشرده شده و سپس توسط گاز خروجی از میکروتوربین گازی گرم می‌شود. سپس هوا به عنوان اکسید کننده وارد بخش کاتد پیل سوختی اکسید جامد می‌شود. استفاده از هیدروژن خالص در پیل‌های سوختی می‌تواند راندمان بالاتر را در پی داشته باشد. CO تاثیر منفی بر ویژگی پیل دارد، زیرا نرخ اکسیداسیون CO کمتر از نرخ اکسیداسیون H_2 است [22]. خروجی آند شامل آب تولید شده توسط اکسیداسیون هیدروژن و مخلوط با گاز سنتزی، برای پیشبرد فرآیند اصلاح است. CO در گاز سنتزی اصلاح می‌شود تا باعث افزایش مقدار هیدروژن تا حد امکان، جهت افزایش راندمان تولید توان الکتریکی شود. سوخت واکنش نداده سپس برای احتراق در پس‌سوز جهت بهبود دمای ورودی و نیز بیشینه‌سازی راندمان تولید توان الکتریکی میکروتوربین گازی استفاده می‌شود. در آند پیل سوختی، به دلیل واکنش آب و CO ، H_2 تولید می‌شود. واکنش صورت گرفته در آند، اکسیداسیون H_2 است:



پیل سوختی اکسید جامد در اصل متشکل از یک کاتد، یک آند و الکترولیت‌ها است. آن‌ها معمولاً از جنس کامپوزیت‌های فلزی-سرامیکی شامل کبالت، نیکل یا زیرکونیا می‌باشد. کبالت یا نیکل رسانایی خوب را تضمین می‌کند. کاتد متشکل از کامپوزیت‌های یونی و سرامیکی هادی الکتریسیته که معمولاً شامل ذرات استراناسیوم در لانتانوم منگانیست است، می‌باشد. سطح کاتد و آند متخلخل است که این تخلخل، ناحیه سطحی قابل‌ملاحظه برای ذخیره بار فراهم می‌کند. پیل سوختی اکسید جامد از الکترولیت‌های اکسید جامد فلزی سرامیکی استفاده می‌کند که معمولاً زیرکونیای تثبیت شده با یوتریم فشرده است. الکترولیت رسانای عالی یون‌های منفی (یون‌های اکسیژن) در دمای بالا است. یون‌های اکسیژن از طریق الکترولیت به آند منتقل شده و سپس واکنش اکسیداسیون هیدروژن برای تولید آب رخ می‌دهد. گاز سنتزی استفاده نشده در پیل سوختی اکسید جامد به پس‌سوز منتقل می‌شود. گاز دما بالا و فشار بالای حاصل از احتراق، توربین را به‌کار می‌اندازد. پارامترهای اصلی و مهم واحد پیل سوختی اکسید جامد- میکروتوربین گازی در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳- پارامترهای طراحی واحد پیل سوختی اکسید جامد-

میکروتوربین گازی [23]

پارامترها	مقدار
دمای عملیاتی پیل (°C)	۹۰۰
فشار عملیاتی پیل (bar)	۴/۳۲
راندمان میدل DC به AC	٪۹۵
فاکتور استفاده از سوخت	٪۸۵
نسبت فشار	۱/۴ [۳]
راندمان بی‌درروی کمپرسور	٪۸۰
راندمان مکانیکی کمپرسور	٪۹۵
راندمان بی‌درروی توربین	٪۸۴
راندمان مولد	٪۹۵

۳- مدل سیستم

مدل شبیه‌سازی عددی برای شیمی گرمای خورشیدی و مدل پیل سوختی اکسید جامد در این بخش به تفصیل توضیح داده می‌شوند. برخی روش‌های ارزیابی جهت ارزیابی عملکرد سیستم جدید استفاده می‌شوند.

۳-۱- تجزیه متانول در فرآیند شیمی گرمای خورشیدی

مدل واکنش تجزیه متانول در فرآیند شیمی گرمای خورشیدی با روش بی‌نهایت کوچک^۱ پایه‌گذاری می‌شود. فرآیند واکنش در طول گیرنده/راکتور به n واحد تقسیم می‌شود. ابتدا شرایط اولیه و شرایط مرزی با توجه به میدان آینه و پارامترهای کاتالیزور تعیین می‌شوند. سپس هر واحد از ورودی راکتور تا خروجی محاسبه می‌شود. در هر واحد واکنش، جذب گرما، جریان مولی واکنش متانول، تغییر دمای واکنش و افت فشار محاسبه می‌شوند. بخشی از گرمای جذب شده توسط راکتور، گاز مخلوطی را گرم می‌کند و بخش دیگر برای واکنش-های شیمیایی به کار می‌رود و گاز سنتزی و دمای گاز مخلوط را می‌توان با توجه به بقای انرژی بدست آورد. با تغییر دما و فشار، تعادل شیمیایی به تدریج حرکت می‌کند و گاز سنتزی بیشتری در جهت جریان تولید می‌شود.

در جدول ۴، فرمول‌های استفاده شده در مدل واکنش تجزیه متانول در فرآیند شیمی گرمای خورشیدی ارائه می‌شوند. در این مدل، نرخ تبدیل متانول و راندمان استفاده از انرژی خورشیدی محاسبه خواهد شد.

جدول ۴- فرمول‌ها در محاسبات فرآیند شیمی گرمای خورشیدی

ورودی انرژی خورشیدی	$Q_{sol} = DNI \cdot A / 1000$	(۴)
جذب گرما	$Q_{solar-in} = DNI \cdot A \cdot \frac{\eta_{opt}}{1000} - Q_{loss}$	(۵)
موازنه انرژی	$Q_{solar-in} = Q_{react} + Q_{heat}$	(۶)
نرخ واکنش متانول	$r_D = (k_D \cdot K_{CH_3O(2)}^* \cdot (P_{CH_3OH} / P_{H_2}^{0.5}) \cdot (1 - \frac{P_{H_2}^* \cdot P_{CO}}{k_D \cdot P_{CH_3OH}}) \cdot CS_2 \cdot CS_{2a}) / [1 + K_{CH_3O(2)}^* \cdot (P_{CH_3OH} / P_{H_2}^{0.5}) + (1 + K_{H_2a}^{0.5} \cdot P_{H_2}^{0.5})]$	(۷)
ثابت نرخ	$k_D = k_D^0 \exp(-\frac{E_D}{RT})$	(۸)
ثابت‌های تعادل	$K_{CH_3O(2)}^* = \exp(-\frac{\Delta S_{CH_3O(2)}^*}{R} - \frac{\Delta H_{CH_3O(2)}^*}{RT})$	(۹)
ثابت‌های تعادل	$K_{H_2a} = \exp(-\frac{\Delta S_{H_2a}^{(2a)}}{R} - \frac{\Delta H_{H_2a}^{(2a)}}{RT})$	(۱۰)
جریان مولی واکنش متانول	$n_{CH_3OH-React} = r_D \cdot A_m \cdot \rho_{cat} \cdot V_{cat}$	(۱۱)
نرخ تبدیل متانول	$X_{cov} = (n_{CH_3OH} - n_{CH_3OH-React}) / n_{CH_3OH}$	(۱۲)

۳-۲- مدل پیل سوختی اکسید جامد

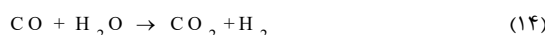
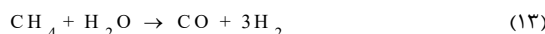
عملکردهای مورد نظر سیستم توان الکتریکی پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی توسط نرم‌افزار^۲ EES عملیاتی می‌شود [24].

محاسبه ولتاژ پیل محور اساسی مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد است. عملکرد مورد استناد پیل سوختی اکسید جامد بر پایه آزمایشات است که توسط زیمنس-وستینگهاوس انجام شده است. طبق معادلات نیمه‌تجربی، تأثیر دما، فشار ترکیب سوخت/هوا و چگالی جریان بر روی ولتاژ مرجع بدست می‌آید. جدول ۵ محاسبه توان الکتریکی خروجی در پیل سوختی اکسید جامد را نشان می‌دهد. در بخش حاضر، مدل‌سازی ترمودینامیکی سیستم ارائه گردیده است. در محاسبات از فرض‌های زیر استفاده شده است [25]: هوای اتمسفر از ۷۹٪ نیتروژن و ۲۱٪ اکسیژن تشکیل شده است. گاز طبیعی حاوی ۱۰۰٪ متان فرض شده است. تحلیل در شرایط تعادل ترمودینامیکی و همچنین حالت پایا در نظر گرفته شده است. از تغییرات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده است. مبادله‌کن‌های گرمایی عایق هستند و هیچ تبادل گرمایی با محیط صورت نمی‌گیرد. گازهای نسوخته بصورت کامل در پس‌سوز پیل سوختی اکسید جامد اکسید می‌شوند. همچنین گاز طبیعی در بویلر بطور کامل می‌سوزد. داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی سیستم در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- داده‌های ورودی برای پیل سوختی و اجزای نیروگاه [25]

سیستم پیل سوختی اکسید جامد	
۵۰ cm ²	سطح فعال
۷۹٪	بازده اینورتر AC-DC
۸۵٪	فاکتور مصرف سوخت (FU)
۸۰۰ °C	دمای پایه ورودی به پیل سوختی
۵۵۰۰	تعداد سل
۲۱۵	نسبت بخار به کربن
مبادله‌کن‌های گرمایی	
۵-۲٪	افت فشار
پمپ‌ها	
۹۰٪	بازده اینتروپمپ
متمرکز کننده توان خورشید	
۶۰ °C	اختلاف دما
آب	سیال عامل
شرایط محیط	
۱۵ °C	دمای محیط
۳۲۵ kPa	فشار محیط
انرژی شیمیایی استاندارد	
۸۳ kJ/mol	CH ₄
۲۰ kJ/mol	CO ₂
۲۷۵ kJ/mol	CO
۱ kJ/mol	N ₂
۴ kJ/mol	O ₂
۲۳۶ kJ/mol	H ₂
۱۰ kJ/mol	H ₂ O (g)

پیل سوختی دارای سه بخش اصلی است: آند، کاتد و یک الکترولیت که در بین آند و کاتد قرار دارد. سوخت و هوا به ترتیب به آند و کاتد فرستاده می‌شوند، جایی که سوخت در یک فرآیند الکتروشیمیایی اکسید شده و اکسیژن کاهش می‌یابد و باعث تولید جریان مستقیم در مدار خارجی می‌شود. واکنش‌های شیمیایی در سل‌ها عبارتند از:

^۱ Infinitesimal method^۲ Engineering Equation Solver

معادله (۱۳) مربوط به واکنش اصلاح است که در آن گاز متان به هیدروژن و مونوکسیدکربن تبدیل می‌شود. معادله (۱۴) مربوط به واکنش دگرگونی است که در آن مونوکسیدکربن تولید شده در واکنش اصلاح با بخار آب واکنش داده و در نتیجه، هیدروژن بیشتری تولید می‌شود. سپس هیدروژن تولید شده از این واکنش‌ها در واکنش الکتروشیمیایی زیر شرکت می‌کند:



طراحی مکانیکی مبادله‌کن‌های گرمایی به منظور محاسبه ضریب انتقال گرما و نیز سطح مورد نیاز برای انتقال گرمای مناسب، در نرم‌افزار ASPEN EDR انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی سیستم کلی، مقدار گرمای مورد نیاز هاضم که توسط شرکت آب و فاضلاب تبریز ارائه شده است، بیوگاز تولیدی در محل تصفیه‌خانه و نیز ورودی-های مورد نیاز برای تولید ۶۰ kW توان الکتریکی از پیل سوختی، به‌عنوان ورودی‌های کل سیستم لحاظ می‌شوند. با نوشتن موازنه جرم و انرژی برای اجزای سیستم و حل همزمان معادلات، خروجی‌های مدنظر که به واقع، میزان مساحت مورد نیاز سیستم خورشیدی، بازده کل سیستم و میزان گاز طبیعی مصرفی به‌عنوان سوخت می‌باشند، محاسبه خواهد شد. جهت اختصار، مدل‌سازی الکتروشیمیایی با جزئیات بیشتر در ضمیمه (الف) آورده شده است.

طی واکنش الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد، سوخت به طور کامل مصرف نمی‌شود. با در نظر گرفتن اکسیداسیون H_2 به جای واکنش اکسیداسیون پیل، فقط H_2 در آند واکنش نشان می‌دهد. فاکتور استفاده از سوخت U_f به صورت نسبت مولی هیدروژن مصرف شده در واکنش‌های آند به گاز سنتزی تغذیه شده به آند تعریف می‌شود.

$$U_f = \frac{(n_{H_2})_{consumed}}{(n_{H_2} + n_{CO})_{Anode}} \quad (16)$$

هوا به‌عنوان اکسیدکننده برای شرکت در واکنش وارد کاتد پیل سوختی اکسید جامد می‌شود. اختلاف هنگام استفاده از هوا یا اکسیژن خالص به‌عنوان اکسیدکننده کمتر از ۳٪ است [26] هوا به‌جای اکسیژن به خاطر هزینه اقتصادی به‌عنوان اکسیدکننده انتخاب می‌شود. با توجه به جریان مولی هیدروژن، مقدار اکسیژن مصرف شده توسط آند باتری با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{O_2} = (n_{H_2} + n_{CO}) \cdot U_f^{0.5} \quad (17)$$

۳-۳- روش‌های ارزیابی

در این بخش، راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی شیمیایی، انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی و انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی و نیز راندمان انرژی برای ارزیابی این سیستم جدید استفاده می‌شوند.

$$\eta_{sol-che} = \frac{Q_{chem}}{Q_{sol}} = \Delta H_r \cdot X_{cov} \cdot n_{CH_3OH} / Q_{sol} \quad (18)$$

که در آن Q_{sol} ، n_{CH_3OH} ، X_{cov} ، ΔH_r به ترتیب تغییر آنتالپی واکنش تجزیه متانول، نرخ تبدیل متانول، جریان مولی ورودی متانول و

انرژی ورودی خورشیدی است. X_{cov} از طریق تحلیل اجزای محصول می‌تواند بدست آید.

راندمان تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی $\eta_{che-ele}$ به صورت نسبت توان الکتریکی خروجی به انرژی شیمیایی گاز سنتزی ورودی بیان می‌شود. این عملکرد واحد پیل سوختی اکسید جامد- میکروتوربین گازی را نشان می‌دهد.

$$\eta_{che-ele} = (\dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{MGT} - \dot{W}_{comp}) / \dot{Q}_{syngas} \quad (19)$$

که در آن \dot{W}_{SOFC} توان الکتریکی خروجی از پیل سوختی اکسید جامد است، \dot{W}_{MGT} نشان‌دهنده توان الکتریکی خروجی از میکروتوربین گازی، \dot{Q}_{syngas} و \dot{W}_{comp} به ترتیب توان الکتریکی مصرفی کمپرسور و نرخ انرژی شیمیایی گاز سنتزی است.

راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی $\eta_{sol-che}$ حاصل ضرب $\eta_{che-ele}$ $\eta_{sol-che}$ است. این عملکرد انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی در سیستم را نشان می‌دهد.

$$\eta_{sol-che} = \eta_{che-ele} \cdot \eta_{sol-che} \quad (20)$$

راندمان تولید توان الکتریکی سیستم $\eta_{sys-ele}$ را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\eta_{sys-ele} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{W}_{MGT} - \dot{W}_{comp}}{\dot{Q}_{sol} + H_{CH_3OH} \cdot G_{CH_3OH}} \quad (21)$$

که در آن H_{CH_3OH} و G_{CH_3OH} به ترتیب آنتالپی و دبی مولی جریان متانول می‌باشند.

راندمان کلی انرژی سیستم η_{tot} به صورت نسبت خروجی‌های شامل سرمایش، گرمایش و توان الکتریکی به ورودی سیستم تعریف می‌شود.

$$\eta_{tot} = \frac{C + Q + W_{net}}{Q_{sol} + H_{CH_3OH} \cdot G_{CH_3OH}} \quad (22)$$

که در آن C، Q و W_{net} به ترتیب خروجی‌های سرمایش، گرمایش و توان الکتریکی سیستم هستند.

از دیدگاه تلفات برگشت‌ناپذیر، راندمان انرژی η_{ex} را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [27]:

$$\eta_{ex} = \frac{W + Q \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) + C \left(\frac{T_0}{T_C} - 1\right)}{E_{sol} + G_{CH_3OH} \cdot E_{CH_3OH}} \quad (23)$$

که در آن T_0 ، T_C و T_H به ترتیب دمای محیط، دمای تبرید و دمای گرمایش می‌باشند و E_{sol} نشان‌دهنده انرژی خورشیدی است.

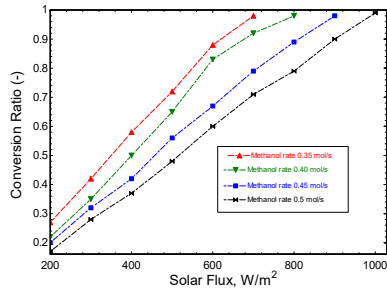
۴- نتایج و بحث

در این بخش، عملکردهای اجزای اصلی سیستم ارائه می‌شوند. بر اساس نتایج، عملکردهای این سیستم تحت شرایط طراحی و خارج از طراحی مورد بحث قرار می‌گیرند و می‌توان شبیه‌سازی‌های عددی را برای تحلیل مشخصه‌ها و بحث روی آنها و نیز تحلیل استراتژی‌های عملکردی و بحث روی آنها تحت شارهای خورشیدی متغیر برای بارهای مصرفی مشخص به کار بست.

۴-۱- عملکرد فرآیند شیمی گرمای خورشیدی

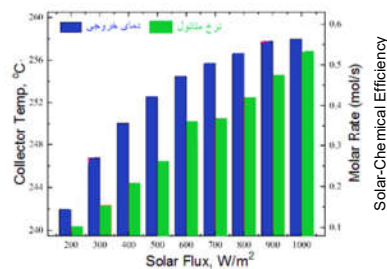
انرژی خورشیدی جذب شده توسط راکتور برای گرم کردن گاز مخلوط شده و نیز تأمین گرمای واکنش در راکتور تطبیق داده می‌شود. در امتداد جریان گاز، متانول بیشتری وارد واکنش می‌شود و گرمای جذب شده در واکنش را کاهش می‌یابد. با کاهش جذب گرمای واکنش،

نرخ تبدیل متانول و دمای گردآور با دبی مولی متانول و نیز شار خورشیدی تغییر می‌کند. تغذیه متانول و شار خورشیدی به طور قابل توجهی بر عملکرد شیمی گرمای خورشیدی تأثیر می‌گذارند. X_{COV} ابتدا به شدت افزایش یافته و سپس سرعت آن کم می‌شود تا تقریباً واکنش کامل شود، زمانی که شار خورشیدی از $200 W/m^2$ به $1000 W/m^2$ تغییر کند. جهت حصول تبدیلی مناسب و رضایت‌بخش، با افزایش شار خورشیدی، نرخ تغذیه متانول بیشتری مورد نیاز است.



شکل ۳- دمای گردآور و دبی متانول نسبت به شار خورشیدی

مختلف تنظیم می‌شود. هنگامی که شار خورشیدی از مقدار W/m^2 به $2000 W/m^2$ افزایش می‌یابد، با نظارت بر تغییر دمای راکتور، تغذیه متانول تنظیم می‌شود و $\eta_{sol-che}$ از ۶۳٪ به ۶۷٪ افزایش می‌یابد. تحت تابش‌های متغیر، با کنترل مناسب دما و تنظیم جریان متانول، استفاده کارآمد از انرژی خورشیدی حاصل می‌شود.

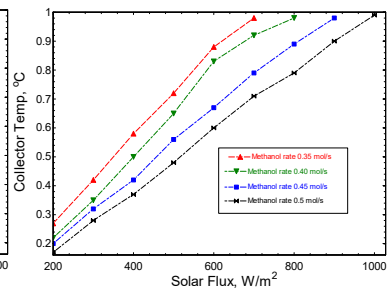


شکل ۴- دمای گردآور و دبی مولی متانول نسبت به شار خورشیدی

میکروتوربین گازی استفاده می‌شود، مرتبط است. شکل ۶ عملکردهای U_f که بر توان الکتریکی خروجی پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی و مصرف توان الکتریکی جهت فشرده‌سازی تأثیر می‌گذارد، نشان می‌دهد.

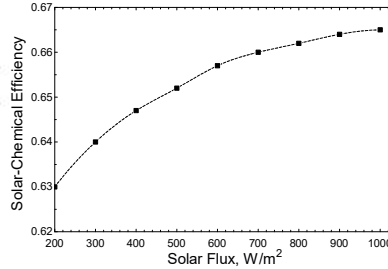
شکل ۶- توان الکتریکی تولیدی در پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی و توان مصرفی کمپرسور، نسبت به U_f

انرژی گرمایی بیشتر، دمای مخلوط گاز را افزایش می‌دهد. افزایش دما برای واکنش سودمند می‌باشد، زیرا فرآیند شیمی گرمای خورشیدی یک واکنش گرماگیر است. تا زمانی که متانول به صورت کامل واکنش بدهد، تمام گرمای جذب شده توسط راکتور جهت گرمایش گاز استفاده می‌شود. دمای لوله گردآور به تدریج در امتداد گیرنده راکتور افزایش می‌یابد. در این حین، دمای بالای راکتور به تشویه کاتالیزور منجر خواهد شد. دمای راکتور به تابش خورشید مرتبط است و باید تحت تابش‌های مختلف کنترل شود. در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که



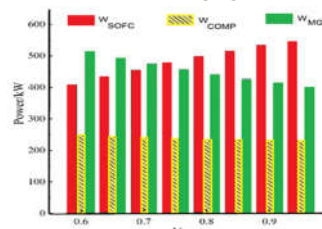
شکل ۲- نرخ تبدیل متانول نسبت به شار خورشیدی

شار خورشیدی دائماً در حال تغییر و غیرقابل پیش‌بینی است. به منظور بهبود راندمان استفاده از انرژی خورشیدی، شارهای خورشیدی متغیر باید به خوبی با تغذیه‌های مختلف متانول مطابقت داشته باشند. شکل‌های ۴ و ۵ عملکردهای عملیاتی را در فرآیند شیمی گرمای-خورشیدی نشان می‌دهد. در روند آزمایشات، متانول با دمای راکتور کنترل می‌شود، زیرا شار خورشیدی مستقیماً بر آن تأثیر می‌گذارد. دمای راکتور بین دمای $238^\circ C$ تا $258^\circ C$ تحت شارهای خورشیدی



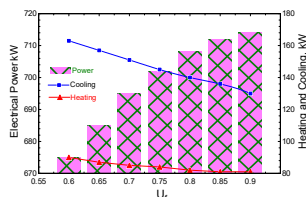
۲-۴- عملکرد پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین-گازی

U_f به‌عنوان یکی از مهمترین فاکتورهای پیل سوختی اکسید جامد، وظیفه‌ای مهم در راندمان پیل سوختی دارد. آن همچنین به طور نزدیک با ترکیبات خروجی از جمله سوخت نسوخته که بیشتر در



اگر U_f از $0/6$ به $0/9$ تغییر کند، به دلیل افزایش تلفات قطبش، ولتاژ پیل کاهش خواهد یافت. هر چه H_2 بیشتری مصرف شود، چگالی جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. اثر جریان قابل‌ملاحظه است که ممکن است به افزایش توان الکتریکی خروجی پیل سوختی اکسید جامد منجر شود. در همین حال، سوخت نسوخته وارد پس‌سوز شده و هوای مصرف شده کاهش می‌یابد، در نتیجه توان الکتریکی خروجی

میکروتوربین گازی و توان الکتریکی مصرفی کمپرسور کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن اثرات پیل سوختی اکسید جامد، میکروتوربین گازی و نیز کمپرسور، کل توان الکتریکی خروجی با تغییرات U_f سازگار است، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است. وقتی U_f افزایش می‌یابد، به دلیل کاهش هوای مصرفی و دمای گاز خروجی، انرژی کمتری برای خروجی سرمایه‌ش و گرمایش مصرف می‌شود.



شکل ۷- توان الکتریکی تولیدی و توان گرمایش و سرمایه‌ش نسبت به U_f

بازده کلی	٪	۸۴/۵۶
گرمایش <td>(kW)</td> <td>۷۸/۷۷</td>	(kW)	۷۸/۷۷
ذخیره انرژی <td>(kW)</td> <td>۱۴۰/۳۶</td>	(kW)	۱۴۰/۳۶
سرمایش <td>(kW)</td> <td>۱۲۶/۶۲</td>	(kW)	۱۲۶/۶۲
توان خروجی <td>(kW)</td> <td>۶۹۴/۲</td>	(kW)	۶۹۴/۲

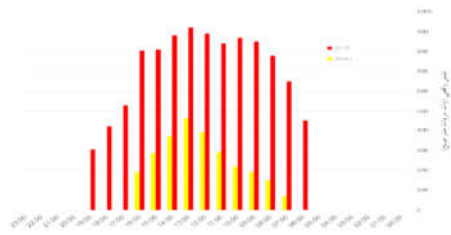
۴-۴- عملکرد سیستم در شرایط طراحی

سیستم جدید از متانول و انرژی خورشیدی به عنوان ورودی‌ها بهره گرفته و خروجی‌های سرمایه‌ش، گرمایش و برق تولید می‌کند. تحلیل انرژی برای تحقیق عملکردهای ترمودینامیکی به کار گرفته می‌شوند. جدول ۷ نتایج ارزیابی را نشان می‌دهد.

جدول ۷- تحلیل انرژی در شرایط طراحی

نسبت‌ها(٪)	انرژی(kW)	ورودی انرژی کل
۱۰۰	۱۳۰۲/۲۸	ورودی انرژی کل
۸۱/۴۲	۱۰۶۰/۳۶	انرژی شیمیایی متانول
۱۸/۵۸	۲۴۱/۹۲	ورودی انرژی خورشیدی
۸۰/۷۴	۱۰۵۱/۴۷	خروجی انرژی کل
۵۴/۵۴	۷۱۰/۳۱	توان الکتریکی
۱۰/۴۹	۱۳۶/۶۵	سرمایش
۶۳	۸۰/۷۱	گرمایش
۹/۵۱	۱۲۳/۸	ذخیره انرژی

راندمان کل η_{tot} به $۸۰/۷۴$ می‌رسد، در حالی که انرژی خورشیدی $۱۸/۵۸$ ٪ از انرژی ورودی را تشکیل می‌دهد. همچنین در شرایط طراحی، $\eta_{che-ete}$ $۵۸/۳$ ٪ است. $\eta_{sol-che}$ به ۶۶ ٪ می‌رسد و $\eta_{che-ete}$ ۶۱ ٪ است، بنابراین $\eta_{sol-ete}$ می‌تواند ۴۰ ٪ باشد. در مقایسه با سایر روش‌های استفاده از انرژی خورشیدی، روش پیشنهادی یک راندمان بالا و یک روش منطقی برای استفاده از انرژی خورشیدی را ارائه می‌دهد.



شکل ۸. تابش واقعی خورشید برای یک روز متداول در تابستان و زمستان در شهر تهران

گاز سنتزی به طور کامل توسط پیل سوختی اکسید جامد- میکروتوربین گازی استفاده می‌شود و گرمای اتلافی نیز در یک مبرد جذبی لیتیم-بروماید و همچنین در خروجی سرمایه‌ش استفاده می‌شود. بنابراین، کل خروجی سیستم پایدار مانده و توان الکتریکی، سرمایه‌ش و گرمایش فقط با U_f تغییر می‌کند.

۴-۳- بهینه‌سازی سیستم پیشنهادی

در این قسمت بر اساس تحلیل پارامتریکی که انجام شد و متغیرهایی که در عملکرد سیستم نقش بسزایی داشتند به منظور پیشینه نمودن بازده کلی سیستم بهینه‌سازی تک هدفه‌ای انجام شد. در این راستا، متغیرهای ارزیابی به صورت زیر در نظر گرفته شد و با استفاده از نرم افزار EES، متغیر وابسته بازده ترمودینامیکی به عنوان هدف اصلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعریف شده مورد بهینه‌سازی قرار گرفت.

Objective Function :

$$\text{Max } (\eta_{tot})$$

Variables :

$$500 \frac{A}{m^2} \leq j \leq 3500 \frac{A}{m^2}$$

$$0.7 \leq U_f \leq 0.95$$

$$650^\circ\text{C} \leq T_j \leq 850^\circ\text{C}$$

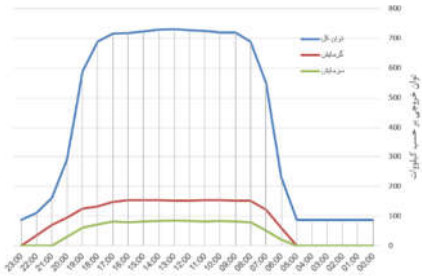
$$1.5 \leq S/C \leq 2.5$$

$$100 \frac{W}{m^2} \leq SF \leq 1000 \frac{W}{m^2}$$

در جدول ۶ همانطور که مشخص است نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که در صورتی که متغیرهای تعیین کننده به صورت جدول زیر تعیین گردند بیشترین بازده سیستم بدست می‌آید این در حالی است که در این شرایط مقدار توان خالص تولیدی مقداری کمتر از شرایط کارکردی است و دلیل این اتفاق را نیز می‌توان به این صورت توجیه نمود که شرایط متغیرهای مستقل برای بهینه شدن توان خروجی با مقادیر آنها برای پیشینه شدن بازده متفاوت است.

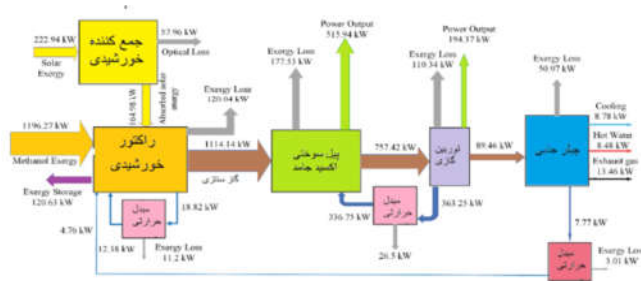
جدول ۶- تحلیل انرژی در شرایط طراحی

واحد	مقدار در حالت بهینه	پارامتر مستقل وابسته
$^\circ\text{C}$	۸۱۰/۵	دمای ورودی پیل
-	۲/۵	نسبت بخار به کربن
-	۰/۸۳	فاکتور مصرف سوخت
W/m^2	۱۰۰۰	تابش خورشیدی
A/m^2	۲۵۶۴	چگالی جریانی



شکل ۱۰. توان تولیدی، بردوت و گرمایش خروجی از سیستم در حالت دینامیک روز تابستانی

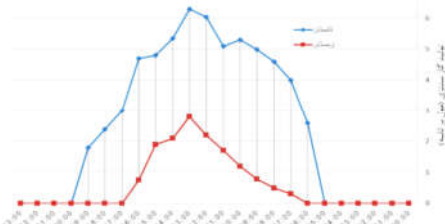
بطور مشخص، تحلیل انرژی برای سیستم می‌تواند دید واقعی-تری نسبت به آنچه به عنوان تحلیل ترمودینامیکی انجام می‌شود به مخاطب ارائه دهد. در تحقیق حاضر علاوه بر اینکه با هدف بدست آوردن بازده انرژی سیستم که به لحاظ کمی و کیفیت می‌تواند در مقایسه با بازده قانون اول دید بهتری ارائه دهد، روابط تحلیل انرژی برای سیستم نوشته شد و سیستم بررسی شد، هدف بعدی به دست آوردن جریان انرژی و همچنین نقاط و اجزایی است که بیشترین نرخ نابودی و اتلاف انرژی وجود دارد. تحلیل انرژی برای ارزیابی تلفات برگشت‌ناپذیر استفاده می‌شود و نمودار جریان انرژی در شکل ۱۱ ارائه می‌شود. بر پایه اصل ماکسول سازی و استفاده آشنایی از انرژی، راندمان انرژی η_{ex} به ۵۷/۶٪ می‌رسد. در شکل می‌توان دید که عمده تلفات انرژی عبارتند از: شیمی گرمای خورشیدی، واکنش پیل سوختی اکسید جامد و خروجی میکروتوربین گازی. طی فرآیند جمع-آوری گرما، تلفات نوری میدان آینه، تلفات برگشت‌ناپذیر نور به گرما و نیز تلفات گرما در واکنش تجزیه خورشیدی متانول، ۱۲/۵۴٪ از کل انرژی ورودی را تشکیل می‌دهد. با احتساب تلفات اجزاء و دمای-کاری بالا، راندمان‌های انرژی پیل سوختی اکسید جامد و میکروتوربین گازی به ترتیب به ۷/۷۱٪ و ۱۲/۵۱٪ می‌رسد. به خاطر تطابق دمایی بسیار خوب بین گاز خروجی و چیلر جذبی لیتیوم-بروماید، اتلاف انرژی رخ داده در واحد تبرید جذبی لیتیوم-بروماید نسبت کمی از انرژی ورودی را شامل می‌شود. بنابراین، این یک روش کارآمد برای بالا بردن راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی با افزایش قابلیت توان الکتریکی در فرآیند جمع‌آوری خورشیدی است، در حالیکه تلفات برگشت‌ناپذیر سوخت در فرآیند استفاده کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- دیاگرام جریان انرژی در سیستم پیشنهادی

شیمی گرمای خورشیدی و پیل سوختی اکسید جامد-میکروتوربین گازی به منظور واقعیت‌سازی تبدیل کارآمد انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی و کاهش مصرف سوخت فسیلی ارائه می‌شود. می‌توان به طور

در شکل ۸ میزان تابش برای یک روز متداول در تابستان و زمستان در شهر تهران نشان داده شده است. برای تحلیل خارج از طراحی و به صورت دینامیک تابش واقعی خورشید به عنوان انرژی ورودی که بهره‌مند شدن از آن باعث تغییرات بازدهی تبدیل متانول به گاز سنتزی خواهد شد مورد استفاده قرار می‌گیرد. میانگین تابش برای روز تابستانی در حدود ۴۲۰ وات بر مترمربع و برای زمستان مقداری بسیار پایین‌تر است. در نتیجه این مقدار تابش، همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود میزان تبدیل متانول به گاز سنتزی روندی مشابه به آنچه برای تابش آفتاب برای روز تابستانی و زمستانی مشاهده می‌شود به دست می‌آید. مشخص می‌توان با تعریف کاربری مناسب برای سیستم پیشنهادی (بیمارستان، ورزشگاه و ...) و با در دست داشتن بارهای مورد نیاز در محل احداث نیروگاه تولید پراکنده بسته به شرایط مورد نیاز بار سیستم ذخیره انرژی نیز تعریف نمود که در این گاز سنتزی مازاد تولیدی در تابستان در ساعات مشخص ذخیره شده و بعداً برای محقق کردن دبی مورد نیاز سیستم برای پایدار شدن سیستم پیل سوختی آن را تزریق نمود.



شکل ۹. میزان تبدیل شده گاز سنتزی برای یک روز تابستانی و زمستانی در نظر گرفته شده

در شکل ۱۰ بر اساس رفتار دینامیک سیستم پیشنهادی تولید توان خالص از کل سیستم در طول روز تعریف‌شده تابستانی ترسیم شده است. همانطور که از نتایج مشخص شده است در ساعاتی که تابش آفتاب در حد قابل‌قبولی بوده، مشخصاً تولید گاز سنتزی نیز مقدار قابل‌توجهی است که منجر به تولید توان بیشینه، گرمایش و سرمایش مناسب شده است.

۵- نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه در کار حاضر، ادغام یک سیستم انرژی توزیع شده با

- System Driven by a Solid Oxide Fuel Cell. *Energy Conversion Management*, Vol. 106, pp. 921-931, 2015.
- [12] Gandiglio M., Saberi-Mehr A., MosayebNezhad M., Lanzini A. and Santarelli M., Solutions for Improving the Energy Efficiency in Wastewater Treatment Plants Based on Solid Oxide Fuel Cell Technology. *Journal of Clean Production*, Vol. 247, pp. 119080, 2020.
- [13] Gadsbøll R. Ø., Thomsen J., Bang-Møller C., Ahrenfeldt J. and Henriksen U. B., Solid Oxide Fuel Cells Powered by Biomass Gasification for High Efficiency Power Generation. *Energy*, Vol. 131, pp. 198-206, 2017.
- [14] Al Moussawi H., Fardoun F. and Louahlia-Gualous H., Review of Tri-Generation Technologies: Design Evaluation, Optimization, Decision-Making, and Selection Approach. *Energy Conversion Management*, Vol. 120, pp. 157-196, 2016.
- [15] Zhou W., Yang H., Rissanen M., Nygren B. and Yan J., Decrease of Energy Demand for Bioethanol-Based Polygeneration System through Case Study. *Applied Energy*, Vol. 95, pp. 305-311, 2012.
- [16] Shekhelein S. and Dubinin A., Hydrogen-Methanol SOFCs for Transport. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.
- [17] Xu Q., Xia L., He Q., Guo Z. and Ni M., Thermo-Electrochemical Modelling of High Temperature Methanol-Fuelled Solid Oxide Fuel Cells. *Applied Energy*, Vol. 291, pp. 116832, 2021.
- [18] Tukenmez N., Yilmaz F. and Ozturk M., Parametric Analysis of a Solar Energy Based Multigeneration Plant with SOFC for Hydrogen Generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 5, pp. 3266-3283, 2021.
- [19] Yuan X., Liu Y. and Bucknall R., Optimised MOPSO with the Grey Relationship Analysis for the Multi-Criteria Objective Energy Dispatch of a Novel SOFC-Solar Hybrid CCHP Residential System in the UK. *Energy Conversion Management*, Vol. 243, pp. 114406, 2021.
- [20] Montes M. J., Abánades A., Martínez-Val J. M. and Valdés M., Solar Multiple Optimization for a Solar-Only Thermal Power Plant, Using Oil as Heat Transfer Fluid in the Parabolic through Collectors. *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 2165-2176, 2009.
- [21] Liu T., Liu Q., Xu D. and Sui J., Performance Investigation of a New Distributed Energy System Integrated a Solar Thermochemical Process with Chemical Recuperation. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 119, pp. 387-395, 2017.
- [22] Saberi-Mehr A., Moharramian A., Hossainpour S. and Pavlov D. A., Effect of Blending Hydrogen to Biogas Fuel Driven from Anaerobic Digestion of Wastewater on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell System. *Energy*, Vol. 202, pp. 117668, 2020.
- [23] Calise F., Palombo A. and Vanoli L., Design and Partial Load Exergy Analysis of Hybrid SOFC-GT Power Plant. *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 225-244, 2006.
- [24] Systems O. EES: Engineering Equation Solver - Manual. F-Chart Software, Box 2003.
- [25] Yari M., Saberi-Mehr A., Seyd Mahmoudi S. M. and Santarelli M., A Comparative Study of Two SOFC Based Cogeneration Systems Fed by Municipal Solid Waste by Means of either the Gasifier or Digester. *Energy*, Vol. 114, pp. 586-602, 2016.
- [26] Suwanwarangkul R., Croiset E., Pritzker M. D., Fowler M. W., Douglas P. L. and Entchev E., Modelling of a Cathode-Supported Tubular Solid Oxide Fuel Cell Operating with Biomass-Derived Synthesis Gas. *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 386-399, 2007.
- [27] Bejan A. and Moran M. J., Thermal Design and Optimization. John Wiley & Sons; 1996.
- کلی بیان کرد که بهره‌گیری از انرژی خورشیدی که از طریق فرآیند شیمی گرمای خورشیدی به انرژی شیمیایی در شکل گاز سنتزی تبدیل می‌شود، به بهبود تراز انرژی خورشیدی و دستیابی به تبدیل کارآمد و موثر انرژی خورشیدی می‌انجامد. نتایج مهم این تحقیق را می‌توان به صورت زیر لیست نمود:
- در سیستم پیشنهادی این تحقیق، با کنترل دبی جریان متانول و دما، به راندمان تبدیل بیش از ۶۰٪ می‌توان دست پیدا کرد.
 - استفاده ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد- توربین گازی با یک سیستم خورشیدی در پیکره یک سیستم تولید چندگانه راندمان کلی انرژی سیستم (۸۱٪) و راندمان انرژی حدود ۶۰٪ را نتیجه می‌دهد.
 - با بهینه سازی عملکرد سیستم از دیدگاه قانون اول نتیجه شد که بازده کلی سیستم تا تقریباً ۸۵٪ می‌تواند قابل حصول باشد.
 - بهره‌گیری از پیل سوختی اکسید جامد برای استفاده از تزریق گاز سنتزی، محدودیت راندمان چرخه کارنو در چرخه‌های توان الکتریکی را برطرف می‌کند. ترکیب پیل سوختی و توربین گازی به طور غیرمستقیم راندمان خالص الکتریکی خورشیدی را به بیش از ۴۰٪ می‌رساند.
- ۶- مراجع**
- [1] Saidur R., Abdelaziz E. A., Demirbas A., Hossain M. S. and Mekhilef S., A Review on Biomass as a Fuel for Boilers. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 15, pp. 2262-2289, 2011.
- [2] Said S. A. M., Waseouddin M. and Simakov D. S. A., A Review on Solar Reforming Systems. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 59, pp. 149-159, 2016.
- [3] Sajgure M., Kachare B., Gawhale P., Waghmare S. and Jagdale G., Direct Methanol Fuel Cell: A Review, Vol. 6, pp. 8-11, 2016.
- [4] Zhu T., Li Q., Xuan Y., Liu D. and Hong H., Performance Investigation of a Hybrid Photovoltaics and Mid-Temperature Methanol Thermochemistry System. *Applied Energy*, Vol. 256, pp. 113908, 2019.
- [5] Bai Z., Liu Q., Gong L. and Lei J., Application of a Mid-/Low-Temperature Solar Thermochemical Technology in the Distributed Energy System with Cooling, Heating and Power Production. *Applied Energy*, Vol. 253, pp. 113491, 2019.
- [6] Liu T., Liu Q., Lei J. and Sui J., A New Solar Hybrid Clean Fuel-Fired Distributed Energy System with Solar Thermochemical Conversion. *Journal of Clean Production*, Vol. 213, pp. 1011-1023, 2019.
- [7] Colella W. G., FuelCell2010- 2016.
- [8] Stambouli A. B. and Traversa E., Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs): A Review of an Environmentally Clean and Efficient Source of Energy. *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 6, pp. 433-455, 2002.
- [9] Saberi-Mehr A., Gandiglio M., MosayebNezhad M., Lanzini A., Seyed Mahmoudi S. M., Yari M. and et al., Solar-Assisted Integrated Biogas Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Installation in Wastewater Treatment Plant: Energy and Economic Analysis. *Applied Energy*, Vol. 191, pp. 620-638, 2017.
- [10] MosayebNezhad M., Saberi-Mehr A., Gandiglio M., Lanzini A. and Santarelli M., Techno-Economic Assessment of Biogas-Fed CHP Hybrid Systems in a Real Wastewater Treatment Plant. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 1263-1280, 2017.
- [11] Chitsaz A., Saberi-Mehr A. and Seyed Mahmoudi S. M., Exergoeconomic Analysis of a Trigenation