نشریه مباحث برگزیده در انرژی، دوره ۴، شماره ۱، سال ۱۴۰۲، صفحات ۲۶ تا ۳۵

مقاله مروری

بررسی بازیابی انرژی از پیل سوختی اکسید جامد

افسانه رحیمی، غلامعلی رحیمی*، تورج دهقانی

موسسه مطالعات بین المللی انرژی

* نویسنده مسئول: alirahimigh2000@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲

چکیده

باتوجه به اهمیت منابع و روشهای استخراج و تبدیل و مصرف انرژی در جهان، در این مقاله به مطالعه انواع سلول‌های سوختی به عنوان سیستمی کارا با قابلیت تبدیل سوخت‌های مختلف بطور مستقیم به الکتریسیته با راندمانی بالا نسبت به سایر سیستم‌های تبدیل انرژی پرداخته می‌شود و مزایا و معایب هر سلول سوختی بطور جداگانه بررسی می‌گردد. همچنین، تحقیقات صورت گرفته در این زمینه توسط محققان طی ۲۰ سال اخیر در سراسر جهان جمع آوری و نتایج ارائه شده مورد مقایسه قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج این بررسی، سلول سوختی اکسید جامد با دارا بودن مزیت‌های بسیار نسبت به سایر سیستم‌های مشابه بطور دقیق بررسی می‌شود و روشهای مختلف بازیابی انرژی اتلافی از این سیستم در ترکیب با سیستم‌های گوناگون و در کاربردهای مختلف و مقیاس‌های متفاوت جهت تولید گرمایش، سرمایش و توان اضافی و در نتیجه افزایش راندمان و کارآیی انرژی در سیستم مورد بحث و مطالعه قرار می‌گیرد. سیستم مورد بررسی علاوه بر مزایای فراوان با مشکلاتی نظیر نبود زیر ساخت‌های لازم برای تولید و استفاده انبوه از آن و قیمت بالای آن نسبت به سایر روشهای سنتی تامین انرژی رو به رو می‌باشد. در آینده، این مشکلات با افزایش سرمایه‌گذاری و حمایت از فناوری‌های انرژی نو رفع خواهند شد و انتظار می‌رود با استفاده انبوه از این سیستم هر ساختمان به خودکفایی در تولید و تامین نیازهای انرژی مصرفی برسد.

کلید واژگان: بازیابی انرژی، پیل سوختی، سیستم سه گانه، تولید همزمان، اکسید جامد

Investigation of energy recovery from solid oxide fuel cell

A. Rahimi, G. Rahimi* and T. Dehghani

Institute for International Energy Studies (IIES)

*Corresponding author: alirahimigh2000@yahoo.com

Received: 06-06-2022 Accepted: 03-09-2023

Abstract

According to the sources and methods of energy extraction and conversion and consumption in the world, in this article the types of fuel cells as an efficient system with the ability to convert different fuels into electricity with high efficiency compared to other energy conversion systems is studied. The advantages and disadvantages of each fuel cell is reviewed. Also, the research done in this field by the researcher during the last 20 years all over the world is collected and the presented results are compared. According to the results of this study the solid oxide fuel cells which have many advantages compared to other similar systems, are carefully studied and different methods of energy recovery from this system in combination with different systems and in different applications and different scales for production of heating, cooling and added power and as a result, efficiency and energy performance of the system is considered. In addition to these advantages, the investigated system faces several problems such as the lack of necessary infrastructures for its production and use and its high price compared to other methods of energy supply. In the future, these problems will be solved with the increase in the investments and supports of new technologies and it is expected that by using this system, every building will reach self-sufficiency in production and supply of energy consumption needs.

Keywords: Energy recovery, Fuel cell, Triple system, CO-Production, Solid oxide

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

۱- مقدمه

طبق اطلاعات اداره اطلاعات انرژی وزارت انرژی ایالات متحده (EIA) (چشم انداز بین المللی انرژی ۲۰۱۷)، مصرف انرژی جهان بین سال های(۲۰۱۵ تا ۲۰۴۰) ۲۸٪ افزایش می یابد و از ۵۷۵ کوادریلیون Btu در سال ۲۰۱۵ به ۷۳۶ کوادریلیون Btu افزایش می‌یابد. اگرچه منابع تجدیدپذیر سریع ترین نوع انرژی در حال رشد در جهان هستند، اما انتظار می رود سوخت‌های فسیلی بیش از سه چهارم انرژی مورد استفاده در سراسر جهان را به خود اختصاص دهند. سلول‌های سوخت می‌توانند نقش مهمی در بهبود بهره‌وری (به عنوان دستگاههای تبدیل انرژی که از طریق ترکیبی الکتروشیمیایی برق تولید می‌کنند) و کاهش انتشار آلاینده‌ها بازی کنند [۱۳و ۱۴]. سلول سوختی در ۲۵ سال گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است و در کاربردهای گوناگونی مانند حمل و نقل دریایی، زمینی و نیروگاها مورد استفاده قرار گرفته است. همانگونه که در جدول (۱) نیز آمارهایی از این سیستم ذکر شده است، بسیاری از برنامه‌های کاربردی برای سلول های سوختی در حال حاضر در مراحل ابتدایی یا اولیه تجاری سازی هستند. اگرچه سلولهای سوختی دارای بسیاری از خصوصیات جذاب برای سیستم های انرژی مطلوب هستند، اما در حال حاضر تجاری سازی آنها محدود است و هزینه و دوام مهمترین چالش آنها هستند [۱۵]. امروزه انواع مختلفی از پیل های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارند.

پیل سوختی قلیایی (AFC) اولین فناوری پیل سوختی بود که مورد استفاده قرار گرفت و تولید برق از هیدروژن را امکان پذیر کرد. بررسی ها نشان می‌دهد که AFC ها سلول های بسیار کارآمدی برای کاربردهای قابل حمل و ثابت هستند [۹و ۱۰]. پیل‌های سوختی اسید فسفریک (PAFC) در حال حاضر یکی از فن‌آوری‌های پیل سوختی است که در بسیاری از کشورهای جهان و برای کاربردهای بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، این فناوری هنوز بسیار پرهزینه است و در مقایسه با سیستم‌های تولید برق جایگزین، به جز در کاربردهای توان برتر، مقرون به صرفه نیست. نیاز به افزایش چگالی توان سلول و کاهش هزینه ها وجود دارد که هر دو به طور جدایی ناپذیری به هم مرتبط هستند [۱۱و ۱۲]. غشاء تبادل پروتون یا سلول سوختی غشایی الکترولیت پلیمری (PEMFC) یک دستگاه تبدیل انرژی الکتروشیمیایی برای کاربرد سبک (حداکثر دمای ۹۰ درجه سانتیگراد) نظیر خودروها، ساختمان ها، باتری‌های قابل شارژ الکترونیکی و غیره است که به دلیل حداکثر تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریسیته بدون هیچ گونه گاز انتشاری و قطعات متحرک، تبدیل به یک دستگاه تبدیل انرژی کارآمد و سازگار با محیط زیست شده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از آمارهای مربوط به هیدروژن و سلول سوختی

کشور	واحدهای CHP	وسایل نقلیه سلول سوختی	ایستگاههای سوختگیری	لیفتراک
ژاپن	۲۲۳۰۰۰	۱۸۰۰ اتومبیل	۹۰	۲۱
آلمان	۱۲۰۰	۱۴ اتوبوس،۴۶۷ اتومبیل	۳۳	۱۶
چین	۱	۵۰ اتوبوس، ۶۰ اتومبیل	۳۶	N/A
ایالات متحده آمریکا	۲۲۵ مگاوات	۳۳ اتوبوس، ۲۷۵۰ اتومبیل	کل: ۷۰ عمومی: ۳۹	۱۱۶۰۰
کره جنوبی	۱۷۷ مگاوات	۱۰۰ اتومبیل	۱۱	N/A
بریتانیا	۱۰	۱۸ اتوبوس، ۴۲ اتومبیل	۱۴	۲

سوخت (هیدروژن خالص) از صفحه جانبی آند سلول تغذیه می‌شود و در تماس با ورق پلاستیکی نازک غشای تبادل پروتون قرار می‌گیرد که با کاتالیزورهای فعال آلیاژ فلزی یعنی پلاتین پوشیده شده است. کاتالیزورها هیدروژن را به الکترون و پروتون (یون هیدروژن) تقسیم می‌کنند. الکترون از یک مدار الکتریکی عبور داده می شود و در آنجا الکتریسیته تولید می کند [۵ و ۶].

پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) پیشرفتی در فناوری پیل سوختی است. به دلیل دمای بالای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نیازی به اصلاح خارجی نیست و امکان بازیابی گرمای اتلافی را فراهم می‌کند که می‌تواند بیشتر برای سیستم‌های توزیع برق همزمان برای کاربردهای ثابت استفاده شود. MCFC راندمان بالایی در حدود ۶۰٪ دارد و گاهی اوقات این راندمان در سیستم های هیبریدی به حدود ۸۰٪ می‌رسد. چالش‌هایی مانند خوردگی، عمر کوتاه، نرخ کاهش اکسیژن کم و هزینه بالا وجود دارد. با این حال، تنوع سوخت های ورودی مختلف مانند گازهای حاصل از تبدیل به گاز زغال سنگ، گاز طبیعی و گازهای زیستی را دارد [۶].

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

سلول‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) معمولاً برای دماهای بالا (حدوداً ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) برای کاربردهای ثابت در صنعت و ابزار استفاده می‌شوند. در حال حاضر، این نوع سلول‌ها اغلب از زیرکونیای تثبیت شده با ایتریا یا اکسید سریم گادولینیوم به عنوان الکترولیت استفاده می‌کنند [۷]. دمای خروجی این نوع سلول سوختی در حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد است که می‌تواند کاربرد بیشتری برای تولید همزمان یا برای سایر چرخه های تبدیل انرژی حرارتی باشد. سوخت در الکترود آند یا الکترود سوخت و هوا در الکترود کاتد یا الکترود هوا تامین می‌شود. یون‌ها در کاتد و از طریق یک الکترولیت جامد تشکیل می‌شوند و با مونوکسید کربن و هیدروژن موجود در سوخت واکنش می‌دهند و با حرکت الکترون الکتریسیته تولید می‌کنند[۱-۳].

جدول ۲- طبقه‌بندی سلول‌های سوختی [۸]

مشخصات	غشای تبادل پروتون	پیل سوختی قلیایی	پیل سوختی اسید فسفریک	کربنات مذاب	پیل سوختی اکسید جامد
دمای کارکرد (درجه سانتی-گراد)	۸۰-۴۰	۲۲۰-۶۵	۲۰۵	۶۵۰	۱۰۰۰-۶۰۰
الکترولیت	غشای تبادل پلیمری هیدراته	هیدروکسید پتاسیم	اسید فسفریک مایع	کربنات مذاب	سرامیک
الکترود	کربن	پلاتین	کربن	نیکل و اکسید نیکل	پروسکایت ها و پروسکایت ها/سرمت-های فلزی
کاتالیست	پلاتین	پلاتین	پلاتین	مواد الکترود	مواد الکترود



شکل ۱- مفهومی از سیستم سلول سوختی اکسید جامد به عنوان انرژی پاک و پایدار

هر سیستم انرژی پیشرفته باید انعطاف پذیر و سازگار باشد. از دیگر خصوصیات مطلوب برای چنین سیستمی می توان به مقرون به صرفه بودن اشاره کرد. یک سلول سوختی خاص که تمام این خصوصیات را دارد سلول سوختی اکسید جامد است[۱۶]. شکل ۱ ویژگی‌های مختلف سیستم سلول سوختی اکسید جامد را نمایش می‌دهد. بطور کلی مزایای این سیستم را می‌توان صورت زیر بیان کرد [۱۷-۱۹]:

- کارآمدترین ژنراتورهای (ورودی سوخت به خروجی الکتریسیته) سلول سوختی هستند که در حال حاضر در سطح جهان توسعه یافته‌اند.
- در انتخاب سوخت‌های کربن مانند گاز طبیعی انعطاف‌پذیر هستند.
- برای بازارهای توزیع شده (یعنی قدرت ثابت) مناسب‌ترین کاربرد است زیرا راندمان تبدیل بالای آن بیشترین سود را در هنگام بالا بودن هزینه سوخت به همراه دارد.
- دارای ساختاری مدولار و جامد است و هیچ قسمت متحرک را ارائه نمی‌دهد. در نتیجه به اندازه کافی ساکت هستند که در داخل خانه نصب شوند.
- دمای عملیاتی بالا باعث تولید فرآورده‌های حرارتی با کیفیت بالا می‌شود که می‌تواند برای تولید همزمان یا

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

برای استفاده در برنامه‌های چرخه ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.

- حاوی فلزات نجیب نیستند که بتوانند در خصوص در دسترس بودن منابع و مسئله قیمت در تولید حجم بالا مشکل‌ساز باشند.
- در مدیریت الکترولیتها (به عنوان مثال، الکترولیتهای مایع که خورنده هستند و کار با آن‌ها مشکل است) مشکلی ندارند.
- با از بین بردن خطر مونوکسید کربن در گازهای خروجی، انتشار بسیار کمی دارند، زیرا مونوکسید کربن تولید شده در دمای عملیاتی بالا به دی اکسید کربن تبدیل می‌شود.
- طول عمربیش از ۴۰۰۰۰-۸۰۰۰۰ ساعت دارند.

در مزایای این سیستم می توان به کندی راه اندازی، هزینه بالا و تحمل محتوای گوگرد سلول سوختی به عنوان برخی از اشکالات آن اشاره کرد. بطور کلی کاربردهای این سیستم های ترکیبی به سه دسته تولید توان (از طریق سلول سوختی و میکروتوربین‌های گازی)، گرمایش (تولید آب گرم و گرمایش فضا) و سرمایش طبقه بندی می شوند.

۲- بازیابی انرژی از سلول سوختی اکسید جامد

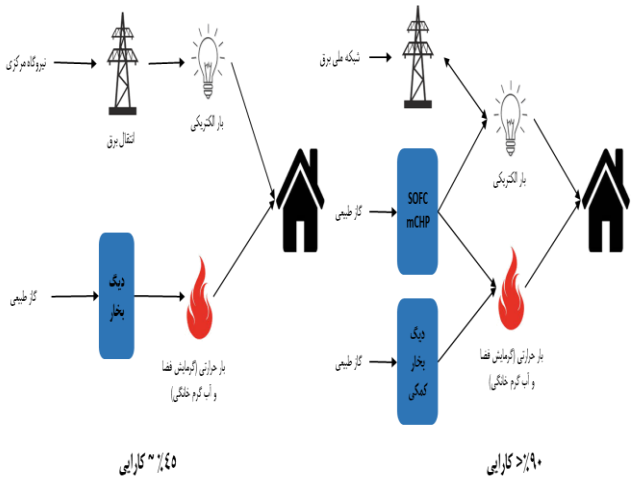
۲-۱- استفاده از انرژی اتلافی برای تولید گرمایش، آب گرم و سرمایش

در حالت سنتی و متمرکز، سوخت پس از انتقال به نیروگاهای حرارتی با تولید بخار آب یا گازهای پرفشار باعث به حرکت درآوردن توربین و چرخش ژنراتور و تولید برق می‌شود که در بهترین حالت همانطور که در شکل (۲) نیز نشان داده شده راندمان به ۴۵٪ می رسد. اما در حالت دیگر، سوخت از شبکه مرکزی به فن آوری اصلی (موتور احتراق داخلی، موتور استرلینگ (SE)، سلول سوختی)، برای تولید نیروی الکتریسیته تأمین می‌شود که در این فرآیند گرما نیز تولید می شود، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، برق به طور مستقیم در خانه استفاده می شود و اگر شبکه تعاملی باشد می تواند در صورت لزوم وارد یا صادر شود.گرمای تولید شده در فرآیند تولید برق بازیابی می‌شود و در برنامه‌هایی مانند گرمایش فضا یا آب گرم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به فن آوری اولیه و میزان استفاده از گرمای اتلافی، بهره وری سیستم را می توان از ۲۰٪ به بیش از ۹۰٪ افزایش داد [۲۰].گرما و توان ترکیبی (CHP) به عنوان تولید گرما و نیرو از یک منبع سوخت واحد، با هدف استفاده از هر دو محصول تعریف می شود. به گرما و توان ترکیبی در ساختمانهای داخلی معمولاً به mCHP گفته می‌شود و معمولاً به عنوان هر چیزی با توان کمتر از ۵ کیلو وات اطلاق می‌شود. این سیستم‌ها در نقطه استفاده از انرژی الکتریسیته تولید می‌کنند که به این تولید غیر متمرکز انرژی (DEG) گفته می‌شود. از مزایای مرتبط با DEG، برخالف نسل متمرکز سنتی، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بهره وری سیستم بهبود می‌یابد. چون در این حالت از گرمای هدر رفته استفاده می‌شود، می‌توان راندمان سیستم را از (۳۰ تا ۵۰) درصد در نیروگاه های مرکزی به حدود (۷۰ تا ۹۰) درصد افزایش داد.
- DEG با mCHP به طور قابل توجهی تلفات انتقال را کاهش می‌دهد که در شبکه انتقال اروپا (۶ تا ۲۴) درصد است.
- بهبود کارایی سیستم و استفاده بیشتر از سوخت منجر به کاهش تقاضای انرژی اولیه و در نتیجه کاهش انتشار دی اکسید کربن و هزینه‌های عملیاتی می‌شود.
- تبدیل گاز کم هزینه (سوخت متداول در mCHP خانگی) به برق به خانوارها امکان می دهد هزینه را پس بگیرند و قبض های انرژی را کاهش دهند.
- کربن زدایی متمرکز تولید برق در بسیاری از کشورها به دلیل مخالفت با فن آوری های کم کربن مانند انرژی های تجدید پذیر و هسته ای مشکل ساز است. (mCHP) در خانه‌های مصرف کنندگان گزینه‌ای برای کمک به این امر و تأمین مزایای صرفه جویی در انرژی می‌باشد.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]



شکل ۲ – سناریوهای انرژی مورد بررسی

یک سیستم ترکیبی پیشنهادی که در خانه‌های خلاق انرژی دانشگاه ناتینگهام نصب شده است، از سلول سوختی اکسیدجامد به عنوان مولد اصلی استفاده می‌کند که گاز طبیعی را با ریفورمر داخلی به هیدروژن خالص تبدیل می‌کند، به همین دلیل نمی‌توان آن را یک تولید کننده کربن صفر در نظر گرفت. اما در مقایسه با سیستم برق شبکه و دیگ بخار حدود ۳۰٪ کاهش انتشار را حاصل می‌کند که در این سیستم در دورهای تقاضای بیش از حد، برق از شبکه سراسری تامین می‌شود و در صورت تولید بیش از نیاز برق صادر می‌شود و انرژی حرارتی تولیدی برای گرمایش استفاده می‌گردد. همین طور در صورت نیاز به انرژی حرارتی بیشتر از یک گرم کن کمکی استفاده می‌گردد.

در مطالعه دیگری که روی یک نیروگاه ۱مگا واتی برای یک محله ۵۰۰ خانواری صورت گرفته[۲۱] ، جریانهای خروجی گرم ناشی از عملیات SOFC در یک سیستم CHP برای تولید آب گرم مسکونی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این بررسی از یک مبدل حرارتی پوسته لوله ای استفاده شده که با عبور گاز اگزوز و آب سرد محلی دمای آب گرم تولیدی به ۵۰ درجه سانتی‌گراد و دمای خروجی گاز در مبدل به ۲۰۰ درجه می‌رسد که بالاتر از نقطه شبنم است. نتایج بدست آمده از این سیستم نشان می‌دهد که این سیستم تقاضای بار از شبکه را در نقاط اوج مصرف به یک سوم کاهش می‌دهد. بطور کلی می توان فرآیند را در این سیستم ترکیبی اینگونه بیان کرد که در ابتدا سوخت و بخار با هم مخلوط می‌شوند و به این ترتیب این مخلوط پیش گرم شده قبل از ورود به آند مقداری اصلاح می‌شود. جریان هوا نیز قبل از ورود به کاتد پیش گرم شده و توسط کمپرسور فشرده می شود. سپس در انتهای فرآیند الکتروشیمیایی سلول سوخت و هوای باقی مانده در مشعل سوزانده می‌شود و از جریان گرم حاصل برای گرمای کل سیستم استفاده می‌شود که شامل گرمای مورد نیاز برای پیش گرمایش سوخت و هوا و همینطور تولید بخارآب اولیه به منظور اصلاح خارجی متان می‌شود. در نهایت توان حرارتی باقی مانده برای گرمایش آب و گرمایش فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهترین روش گرمایش برای این سیستم، گرمایش آهسته می باشد. زیرا سیستم قادر به تامین انرژی مداوم بصورت سریع نمی‌باشد. در کاربرد دیگری این گرمای اگزوز وارد یک پمپ حرارتی می‌شود که علاوه برکاربردهای گرمایشی برای سرمایش نیز می‌توان از آن استفاده کرد که راندمان کلی سیستم را به حدود ۸۷٪ نیز می‌رساند و همچنین بررسی ها نشان می‌دهد بیشترین راندمان سیستم مربوط به گاز آند حدود ۸۲/۵ ٪ می باشد.

نتایج مقایسه یک نمونه پایه با تامین برق از شبکه و دیگ چگالنده با سیستم ترکیبی برای منازل مختلف در خصوص شناسایی فرصتهای مناسب برای سرمایه گذاری با در نظر گرفتن شش پارامتر ظرفیت، هزینه سرمایه، طول عمر، بازده الکتریکی، قیمت صادرات برق و قیمت واردات برق / سوخت نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی برای تقاضای برق در منازل بزرگ‌تر و تقاضاهای بیشتر اقتصادی بوده و البته مقدار صرفه جویی در مقایسه با حالت پایه فقط ۱۶ پوند است[۲۲].

چگالی جریان هم یک پارامتر مهم در عملکرد چرخه است که با افزایش چگالی جریان ولتاژ سلول و در نتیجه کارایی آن کاهش می‌یابد. به طوری که حداکثر بازده در چگالی جریان ۵۵۰۰ آمپر بر متر مربع حدود۴۶٪ است و حداقل بازده در چگالی جریان ۹۵۰۰ آمپر بر متر مربع حدود ۳۱٪ است. به همین ترتیب بالاترین بازده تولید سرمایشی۵۷٪ و کمترین آن ۴۸٪ است و حداکثر تولید گرمایش در چگالی جریان پایین، حدود۶۷٪ و حداقل آن در چگالی جریان بالاتر حدود۶۰٪ گزارش شده است. پارامتر مهم دیگر دماست. با افزایش دما برخی از مولفه ها افزایش و برخی کاهش می‌یابند. چرخه دارای یک دمای بهینه ورودی است که مقدار آن برابر با ۶۳۳ درجه سانتی گراد محاسبه شده است که در این مقدار بالاترین بازده چرخه الکتریکی ۴۱٪ و حداکثر راندمان سیستم سرمایشی ۵۵٪ و تولید گرمایش ۶۴٪ و راندمان کل ۷۸ ٪ محاسبه شده که البته این مقادیر به ازای چگالی جریان ثابت ۸۰۰۰ است.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

از سیستم ترکیب شده توان و گرما برای مقاصد دیگری نیز می‌توان استفاده کرد که در ادامه به آن اشاره می‌شود. استفاده از سیستم CHP در تصفیه خانه‌های فاضلاب نمونه‌ای از آن است[۲۳]. سالانه میلیون‌ها تن لجن فاضلاب تولید می‌شود که توسط هضم بی‌هوازی به بیوگاز تبدیل می‌شوند که این گاز توسط موتورهای احتراق برای تولید گرما و نیرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود برق تجدید پذیر تولید شده پاسخگوی کامل تاسیسات تصفیه خانه نیست. در نتیجه در سالهای اخیر یک اقدام جهانی برای کاهش مصرف و افزایش تولید انرژی در تصفیه فاضلاب وجود داشته است. یکی از روشهای پیشنهادی در این زمینه استفاده از سلول‌های سوختی به جای سیستم های مبتنی بر احتراق است. طی تصفیه فاضلاب، مواد باقیمانده در انتها به دو دسته خشک و مایع تقسیم می‌شوند که مواد خشک می‌توانند در سطح زمین به عنوان مواد مغذی پخش شود و مایع باقی مانده حاوی ۷۰٪ نیتروژن جذب شده طی فرآیند هضم است. سلول‌های سوختی اکسید جامد روشی کارآمد برای استفاده از آمونیاک به عنوان سوخت هستند. درجه حرارت بالا مورد استفاده در عملیات SOFC تجزیه آمونیاک به هیدروژن و نیتروژن را تسهیل می‌کند.

طی تحقیقاتی یک فرایند الکترونیزه‌سازی برای بازیابی آمونیاک از فاضلاب‌های غنی از آمونیوم مصنوعی برای ورود به یک راکتور SOFC با بیوگاز تولید شده از یک راکتور AD با لجن فاضلاب محلی انجام شد. محققان به ترتیب ۹۵٪ و ۷۶٪ بازیافت آمونیوم از فاضلاب‌های مصنوعی رقیق شده و غلیظ را به دست آوردند و ۶۰٪ بهبود در بازده انرژی خالص را نسبت به سیستم‌های معمولی CHP پیش‌بینی کردند که در آن فرآیند بازیابی آمونیاک طی سه مرحله نوار هوا، ستون جاذب و درام فلش صورت می‌گیرد. در نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که تولید برق تجدید پذیر ۴۵ درصد و کاهش مصرف ۶ درصد قابل دستیابی است. علاوه بر این، کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای GHG را به همراه دارد [۲۴].

سیستم تولید سه‌گانه دیگری توسط جنیدی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است که در این سیستم تولید سه گانه SOFC با بیوگاز تولید شده توسط زباله‌های بیمارستانی تغذیه می‌شود. سیستم SOFC شامل چندین مؤلفه از قبیل HRSG (مولد بخار بازیاب حرارت)، چیلر جذب، کمپرسور، محفظه احتراق، پمپ، SOFC اصلاح داخلی، اینورتر / DC AC و اصلاح کننده می‌باشد. علاوه بر تولید برق، سیستم گرمای زباله را بازیابی و استفاده می کند. این گرما منجر به تولید بخار در HRSG می شود و بخار تولید شده در چیلر باعث افزایش بار خنک کننده می‌شود. این سیستم ۵۰٪ میزان برق و بار خنک کننده لازم را تأمین می‌کند و در دراز مدت از نظر اقتصادی به صرفه بوده و سود خالص سالانه تقریباً ۸۷۴/۲۰۰ دلار آمریکا را می‌تواند در پی داشته باشد [۲۵]. علاوه بر این این گرمای زباله بازیابی شده را می‌توان برای تامین بار حرارتی ساختمان نیز به کار برد.

۲-۲- استفاده از گرمای اتلافی برای تولید توان

اخیراً تحقیقات زیادی در مورد SOFC ها و سیستم‌های یکپارچه حاوی SOFC گزارش شده است که یکی از [۲۶]. برای سیستم هیبریدی دو نوع اتصالات حرارتی وجود دارد: مستقیم و غیرمستقیم. در روش مستقیم، فشار کارکرد و سیال چرخه یکسان است، در حالی که در طرح غیرمستقیم چرخه‌ها شرایط کارکرد متفاوتی دارند. سیستم ترکیبی مستقیم معمولاً از آب به عنوان سیال کار استفاده می‌کند و در فاز مایعات کار می‌کند. این چرخه یکی از بهترین گزینه ها برای ادغام SOFC در نظر گرفته شده است. در طرح اتصال حرارتی غیرمستقیم، SOFC ها می‌توانند با چرخه Rankine یا Brayton یا با سیستم ترکیبی گرما و نیرو ترکیب شوند. در زیر نمونه هایی از چرخه‌هایی با اتصالات حرارتی مستقیم آورده شده است [۲۷] :

- چرخه SOFC-Brayton تحت فشار: در این طرح مستقیم، سوخت و هوا وارد کمپرسور می‌شوند و سپس هوا و سوخت تحت فشار از روی آند و کاتد عبور می‌کند. واکنش الکتروشیمیایی رخ می‌دهد. سپس گازهای حاصل از SOFC به یک پسران و یک توربین گازی وارد می‌شود. این سیستم با فشار یکپارچه می‌تواند با گاز طبیعی به ۶۰٪ بهره وری انرژی برسد.
- چرخه SOFC-BraytonCheng تحت فشار: این سیستم ترکیبی یکپارچه شبیه به سیستم فوق است. اما چرخه چنگ که دارای چرخه بازیابی گرمای اگزوز است برای افزایش عملکرد چرخه برایتون ترکیب شده است. یک ژنراتور بخار بازیابی گرما (HRSG) برای تولید بخار و برای بهبود راندمان الکتریکی قبل از توربین اضافه می‌شود. راندمان الکتریکی چرخه تحت فشار-SOFC BraytoneCheng در مقایسه با مورد قبلی 3% افزایش می‌یابد.

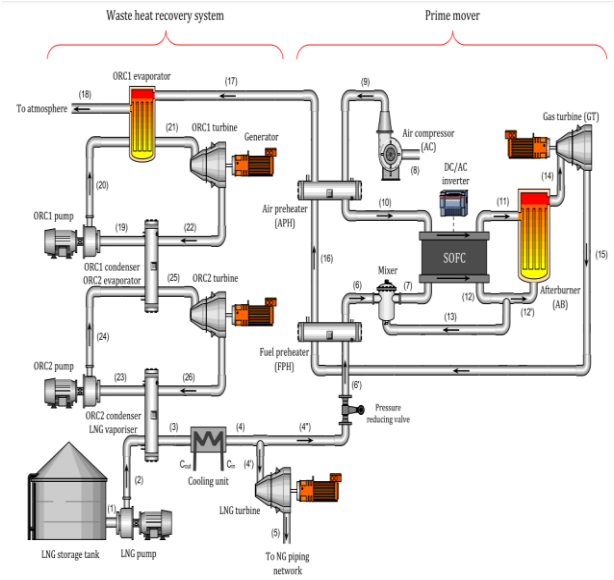
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

- چرخه SOFC-Brayton بدون فشار: هوای ورودی و سوخت SOFC از توربین گازی عبور می‌کند، در حالی که فشار ورودی SOFC جوی است. برای سیستم هیبریدی SOFC راندمان انرژی بهینه ۵۵ درصد پیش بینی شده است.

در سیستم ترکیبی سلول سوختی اکسید جامد، توربین گازی و سیکل رانکینی که توسط عمادی و همکارانش [۲۹] پیشنهاد شده LNG به عنوان سوخت اولیه استفاده شده است. در (۱)که دما پایین است LNG پس از پمپ شدن وارد قسمت سرمایش می‌شود (۳) و مقداری آب سرد مصرفی مورد نیاز تهویه مطبوع و مصارف خانگی را تامین می‌کند. این بخش نقش تبخیرکننده برای تبدیل به گاز طبیعی را دارد. حدود ۹۷٪ ازگاز طبیعی تولید شده که فشار بالایی دارد از یک توبین گازی عبور کرده (4′) و سپس وارد شبکه گاز طبیعی می‌شود (۵) و باقی آن به عنوان سوخت وارد سلول سوختی اکسیدجامد می‌شود (4″). هوای اضافی از کاتد (۱۱) و سوخت باقی مانده (۱۲) از آند ترکیب شده و سوزانده می‌شوند و گازهای حاصل از احتراق با دمای بالا و فشار زیاد وارد توربین گازی شده و برق تولید می کنند (۱۴). سپس گازهای خروجی از توربین گاز که هنوز دارای انرژی زیادی هستند (۱۵) مقداری از گرمای خود را صرف پیش گرمایش سوخت (۶) و هوا کرده (۱۶) و در مرحله بعد وارد تبخیر کننده سیکل رانکین شده (۱۷) و گرمای باقی مانده را به سیال مورد نظر می‌دهند (۲۱) و وارد محیط می‌شوند (۱۸). سیال تبخیر شده با فشار بالا از توربین دیگری در چرخه عبور کرده (۲۲) وبه دلیل اختلاف دما زیاد بین گاز اگزوز و LNG نیاز به استفاده از چرخه رانکین دیگری به عنوان چرخه پایین برای چرخه اول و به حداکثر رساندن بازیابی گرما و و تولید برق می‌باشد. کندانسور چرخه دوم به عنوان تبخیر کننده LNG در ابتدای کار نیز عمل می‌کند.

این سیستم ترکیبی تولید توان نیز می‌تواند با چرخه‌های جانبی دیگری ترکیب شود که در اینجا به بررسی آنها پرداخته می‌شود. سیستم ترکیبی سلول سوختی اکسیدجامد، چرخه بخار رانکین و چرخه جذب (آمونیاک - آب) نمونه‌ای از این سیستم‌ها است. در سیستم پیشنهادی مهرپویا و همکاران [۳۰]خروجی آند و کاتد پس از ترکیب وارد محفظه احتراق شده و در احتراق، بخشی از سوخت که در آند تبدیل نشده است، سوزانده می‌شود.



شکل ۳ – شماتیک سیستم ارائه شده با یک ترکیب ORC حلقه دوگانه برای بازیابی گرمای زباله از SOFC مجهز به توربین گازی

در این سیستم از گازهای خروجی احتراق برای پیش گرمایش سوخت و هوا استفاده می‌شود. از گرمای خارج شده از گازهای خروجی نیز برای تولید بخار مورد نیاز در چرخه بخار رانکین استفاده می‌شود. آب پس از پمپاژ به فشار مورد نظر، وارد دیگ می شود. در مرحله بعد دمای آن با استفاده از گازهای خروجی، افزایش یافته و به بخار گرم شده تبدیل می شود. این بخار طی عبوراز دو مرحله از دو توربین (فشار بالا و فشار پایین) برق تولید می‌کند. بخشی از خروجی توربین فشار قوی، برای افزایش میانگین دمای دیگ بخار استفاده می‌شود. دمای خروجی توربین فشار پایین نیز می‌تواند وظیفه تامین گرمای مورد نیازبرای مولد چرخه جذب (آمونیاک-آب) را فراهم کند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که بازده الکتریکی این سیستم (در نقطه مطلوب) ۶۲/۴٪ است. در طراحی بهینه، چرخه رانکین ۵۵/۳ کیلو وات (۱۱٪) از کل تولید برق را تولید می‌کند. هزینه سرمایه‌گذاری برای سیستم ترکیبی (بدون چرخه جذب) یک کیلو وات حدود ۲۹۱۷ دلار است.

هیبریدهای SOFC / GT (یا فقط SOFC) را می‌توان در نیروگاههای مبتنی بر زغال سنگ گنجانید تا یک سیستم نیروگاهی به یک سیستم یکپارچه‌سازی گاز (FC) تبدیل شود. این یک طراحی منحصر به فرد است که از یک فناوری جدید در یک سیستم انرژی سنتی استفاده می‌کند. این یک مسیر بالقوه برای استفاده از زغال سنگ در تولید برق به شیوه‌ای پاک‌تر و کارآمدتر را ارائه می‌دهد. این فناوری به ویژه در مناطقی مانند چین، جایی که زغال سنگ منبع اصلی تولید

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

برق است، اهمیت دارد. پیکربندی IGFC فرصتی برای استفاده کارآمدتر از زغال سنگ و همچنین ضبط آسان تر دی اکسید کربن فراهم می‌کند[۲۸].

در سیستم پیشنهادی توسط آقایی و همکاران [۳۱] پس از گازی‌سازی زیست توده توسط بخار، بخشی از گازهای سنتز شده وارد بخش پیش اصلاح کننده و بخشی صرف گرم کردن هوا پیش از ورود به کاتد می‌شود. سپس گازهای ساطع شده از آند وارد راکتور حلقه شیمیایی که نقش محفظه احتراق را بازی می‌کنند می‌شوند و گازهای خروجی از کاتد برای تولید برق وارد توبین گازی می‌شوند و گازهای خروجی از توربین هم وارد مولد بخار بازیاب حرارت شده و با دمای محیط خارج می‌شوند. گازهای ساطع شده از آند که وارد حلقه شیمیایی می‌شوند سپس وارد کربناتور شده و گاز های خروجی از آن وارد سیکلون می‌شوند و ذرات جامد از هم جدا می‌شوند و هیدروژن خالص در این حلقه تولید شده که دارای دمای بالایی است و برای استفاده از این پتانسیل موجود وارد مولد بازیاب حرارت جهت تولید بخار می‌شود. طبق بررسی ها راندمان خالص نیروگاه برابر ۵۵/۸ بوده که با افزایش دمای SOFC و ضریب مصرف سوخت راندمان نیروگاه بالا رفته و همین طور توان خروجی با افزایش فشار تا ۱۲ بار برای SOFC افزایش می‌یابد. در جدول ۳ سیستم‌های سنتی تولید توان با انواع سیستم‌های ترکیبی و مستقل پیل سوختی اکسید جامد مقایسه شده‌اند.

۳- نتیجه‌گیری

سلول‌های سوختی اکسید جامد به دلیل داشتن ویژگی‌های جذاب و مزایای گوناگون یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های تبدیل انرژی در نظر گرفته می‌شوند. این سیستم‌ها با راندمان تبدیل انرژی بالا بطور مستقل و همینطور در ترکیب با چرخه‌های دیگر برای تولید برق، گرمایش و سرمایش مورد توجه هستند. بدلیل کارکرد در دمای بالا، امکان بازیابی انرژی از آن‌ها با روش‌های مختلف و ادغام با چرخه‌های گوناگون جهت تولید برق (با استفاده از خروجی‌های آند و کاتد در یک توربین گازی یا مشعل پس سوز جهت استفاده در یک چرخه رانکین)، گرمایش و سرمایش امکان پذیر می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه سیستم های سنتی تولید توان با انواع سیستم‌های ترکیبی و مستقل پیل سوختی اکسید جامد

سیستم پیل سوختی مورد استفاده	مزایا/راندمان سیستم مورد استفاده	محصولات نهایی
سیستم های سنتی تولید توان	راندمان ۳۰٪ الی ۵۰٪	برق
سیستم پیل سوختی اکسید جامد مستقل	راندمان ۶۰٪	برق
سیستم های ترکیبی حرارت و توان(CHP) در منازل مسکونی	افزایش راندمان سیستم انرژی تا حدود ۸۷٪ کاهش ۳۰٪ در انتشار آلایندها	توان- گرمایش فضا- گرمایش آب- سرمایش فضا
سیستم CHP در تصفیه خانه‌های فاضلاب	تولید برق تجدید پذیر ۴۵ درصد کاهش مصرف ۶ درصد	برق تجدید پذیر
سیستم CHP در تصفیه زباله های بیمارستانی	تامین ۵۰٪ برق و بار خنک کننده مورد نیاز	برق تجدید پذیر سرمایش فضا
چرخه-SOFC Braytonتحت فشار	۶۰٪ بهره وری انرژی	توان
چرخه-SOFC Brayton Cheng تحت فشار	۶۳٪ بهره وری انرژی	توان
چرخه -SOFC Brayton بدون فشار	۵۵٪ بهره وری انرژی	توان
سیستم ترکیبی سلول سوختی اکسیدجامد، چرخه بخار رانکین و چرخه جذب آمونیاک	۶۲٪/۴ بازده الکتریکی	توان- حرارت
سیستم ترکیبی سلول سوختی با توبین گازی و زیست توده	راندمان خالص نیروگاه برابر ۵۵،۸	برق تجدید پذیر

این ویژگی علاوه بر افزایش راندمان تبدیل انرژی با کاهش مصرف سوختهای فسیلی و افزایش بهره‌وری از انرژی موجود باعث جلوگیری از تولید یا کاهش چشمگیر در انتشار آلایندها نیز می‌شود که این سیستم را از نظر زیست محیطی نیز محبوب می‌کند. البته این سیستم با مشکلاتی نیز روبه رو می‌باشد که مهمترین آن نبود زیر ساخت های لازم برای تولید و استفاده انبوه از آن و قیمت بالای آن نسبت به سایر روشهای سنتی تامین انرژی می‌باشد. امید است در آینده با سرمایه‌گذاری و حمایت از فناوری‌های انرژی جدید و پاک‌تر این مشکل رفع شود و با استفاده انبوه از این سیستم هر

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

ساختمان به خود کفایی در تولید و تامین نیازهای انرژی مصرفی خود برسد.

منابع

[1] Arshad A, Ali HM, Habib A, Bashir MA, Jabbal M, Yan Y. Energy and exergy analysis of fuel cells: A review. Thermal Science and Engineering Progress. 2019; 9:308-21.

[2] Adams TA, Nease J, Tucker D, Barton PI. Energy conversion with solid oxide fuel cell systems: A review of concepts and outlooks for the short-and long-term. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013; 52(9):3089-111.

[3] Choudhury A, Chandra H, Arora A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013; 20:430-42.

[4] Chandan A, Hattenberger M, El-Kharouf A, Du S, Dhir A, Self V, Pollet BG, Ingram A, Bujalski W. High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC)–A review. Journal of Power Sources. 2013; 231:264-78.

[5] Mert SO, Dincer I, Ozcelik Z. Performance investigation of a transportation PEM fuel cell system. International Journal of Hydrogen Energy. 2012; 37(1):623-33.

[6] Mamaghani AH, Najafi B, Shirazi A, Rinaldi F. Exergetic, economic, and environmental evaluations and multi-objective optimization of a combined molten carbonate fuel cell-gas turbine system. Applied Thermal Engineering. 2015; 77:1-1.

[7] Kundu A, Jang JH. Applications–Portable Portable Devices. Fuel Cells. 2009; 39-45.

[8] Lucia U. Overview on fuel cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014; 30:164-9.

[9] McLean GF, Niet T, Prince-Richard S, Djilali N. An assessment of alkaline fuel cell technology. International Journal of Hydrogen Energy. 2002; 27(5):507-26.

[10] Gülzow E. Alkaline fuel cells. Fuel cells. 2004; 4(4):251-5.

[11] Neergat M, Shukla AK. A high-performance phosphoric acid fuel cell. Journal of Power Sources. 2001; 102:317-21.

[12] Sammes N, Bove R, Stahl K. Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004; 8(5):372-8.

[13] Kirubakaran A, Jain S, Nema RK. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009; 13(9):2430-40.

[14] Minh NQ, Shirley Meng Y. Future energy, fuel cells, and solid-oxide fuel-cell technology. MRS Bulletin. 2019; 44:682-3.

[15] Baldi F, Moret S, Tammi K, Maréchal F. The role of solid oxide fuel cells in future ship energy systems. Energy. 2020; 194:116811.

[16] Staffell I, Scamman D, Abad AV, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. Energy & Environmental Science. 2019; 12(2):463-91.

[17] Elmer T, Worall M, Wu S, Riffat SB. Emission and economic performance assessment of a solid oxide fuel cell micro-combined heat and power system in a domestic building. Applied Thermal Engineering. 2015; 90:1082-9.

[18] Colson CM, Nehrir MH. Evaluating the benefits of a hybrid solid oxide fuel cell combined heat and power plant for energy sustainability and emissions avoidance. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2010; 26(1):140-8.

[19] Hawkes AD, Aguiar P, Croxford B, Leach MA, Adjiman CS, Brandon NP. Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy: Options for provision of residential space and water heating. Journal of Power Sources. 2007; 164(1):260-71.

[20] Zink F, Lu Y, Schaefer L. A solid oxide fuel cell system for buildings. Energy Conversion and Management. 2007; 48(3):809-18.

[21] Chitsaz A, Hosseinpour J, Assadi M. Effect of recycling on the thermodynamic and thermoeconomic performances of SOFC based on trigeneration systems; A comparative study. Energy. 2017; 124:613-24.

[22] Hawkes A, Leach M. Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK: Key economic drivers. Journal of power sources. 2005; 149:72-83.

[23] Ranjbar F, Chitsaz A, Mahmoudi SS, Khalilarya S, Rosen MA. Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell. Energy Conversion and Management. 2014; 87:318-27.

[24] El-Gohary MM. Economical analysis of combined fuel cell generators and absorption

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]

chillers. Alexandria Engineering Journal. 2013; 52(2):151-8.

[25] Shariatzadeh OJ, Refahi AH, Rahmani M, Abolhassani SS. Economic optimisation and thermodynamic modelling of SOFC tri-generation system fed by biogas. Energy Conversion and Management. 2015; 105:772-81.

[26] Trendewicz AA, Braun RJ. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities. Journal of Power Sources. 2013; 233:380-93.

[27] Mehrpooya M, Akbarpour S, Vatani A, Rosen MA. Modeling and optimum design of hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine power plants. International Journal of Hydrogen Energy. 2014 ; 39(36):21196-214.

[28] Zhang X, Chan SH, Li G, Ho HK, Li J, Feng Z. A review of integration strategies for solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources. 2010; 195(3):685-702.

[29] Emadi MA, Chitgar N, Oyewunmi OA, Markides CN. Working-fluid selection and thermoeconomic optimisation of a combined cycle cogeneration dual-loop organic Rankine cycle (ORC) system for solid oxide fuel cell (SOFC) waste-heat recovery. Applied Energy. 2020; 261:114384.

[30] Mehrpooya M, Dehghani H, Moosavian SA. Optimal design of solid oxide fuel cell, ammonia-water single effect absorption cycle and Rankine steam cycle hybrid system. Journal of Power Sources. 2016; 306:107-23.

[31] Aghaie M, Mehrpooya M, Pourfayaz F. Introducing an integrated chemical looping hydrogen production, inherent carbon capture and solid oxide fuel cell biomass fueled power plant process configuration. Energy conversion and management. 2016;124:141-54.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.1.26]