

مدل سازی و ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب در مقایسه با میکروتوربین گازی به منظور تولید هم زمان برق و حرارت

حمید رادمنش^{۱*}، حمید هادی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۶	با توجه به افزایش مصرف و قیمت انرژی، کاهش منابع سوخت فسیلی و افزایش نگرانی‌ها در زمینه مسائل زیست محیطی و گرمایش زمین، یافتن راهی به منظور تبدیل انرژی با بازده بالا و اثرات زیست محیطی پایین، ضروری است. پیل‌های سوختی به دلیل بازده تولید توان بالا و اثرات زیست محیطی پایین، فناوری‌هایی مناسب برای تولید انرژی در آینده هستند. در میان پیل‌های سوختی، پیل سوختی کربنات مذاب، دارای دمای عملکرد و بازده تبدیل انرژی بالایی است که این دمای عملکرد بالا منجر به سازگاری با سوخت‌های مختلف می‌شود. از سوی دیگر می‌توان حرارت بالای تولیدی پیل سوختی را به منظور کاربردهای گرمایشی بازبازی کرد. هدف از این پژوهش، مدل سازی و ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی پیل سوختی کربنات مذاب در مقایسه با فناوری مرسوم و متداول میکروتوربین گازی است. با توجه به ارزیابی‌های انجام شده در توان‌های مختلف، بازده تولید توان پیل سوختی به میزان ۲۳٪ بیشتر از میکروتوربین گازی به دست آمد که این امر منجر به کاهش مصرف سوخت در پیل سوختی می‌شود. از لحاظ زیست محیطی مقدار دی اکسید کربن تولیدی در پیل سوختی و میکروتوربین به ترتیب ۳۷۷ و ۶۲۵ گرم به ازای کیلووات ساعت است که نشان دهنده ۴۰٪ انتشار کمتر در پیل سوختی است. در ارزیابی اقتصادی، پارامترهای مختلفی نظیر مالیات بر کربن، قیمت سوخت و قیمت مجموعه پیل سوختی بسیار تأثیر گذارند. با توجه به پیش بینی‌های انجام شده، با افزایش مالیات بر کربن در سال‌های آتی و همچنین کاهش هزینه فناوری پیل سوختی، این فناوری قابل رقابت با فناوری‌های متداول تولید توان، نظیر میکروتوربین گازی می‌شود.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸	
واژگان کلیدی: پیل سوختی کربنات مذاب، میکروتوربین گازی، تولید هم زمان برق و حرارت، بهسازی داخلی غیرمستقیم.	

۱- مقدمه

برای مقابله با این روند، استفاده از فناوری‌های تبدیل انرژی با بازده بالا ضروری است. پیل‌های سوختی، جایگزینی مناسب برای فناوری‌های رایج تولید برق از سوخت‌های فسیلی‌اند. در مقایسه با فناوری‌های رایج فعلی، پیل‌های سوختی دارای بازده بالا و آلاینده‌گی بسیار پایین هستند که این امر به لحاظ کاهش گازهای گلخانه‌ای حائز اهمیت است [۲]. استفاده از این فناوری‌ها به دلیل آلاینده‌گی پایین و بازده بالا، به ویژه در ابعاد کوچک و تولید پراکنده، مناسب است [۳]. به دلیل تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی سوخت به انرژی الکتریکی بدون هیچ احتراق مستقیم، پیل‌های

امروزه انرژی، نقشی بسیار مهم در زمینه پیشرفت اقتصادی، اجتماعی جوامع مختلف ایفا می‌کند. با توجه به توسعه فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و مصارف بومی و خانگی، نیاز به انرژی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه افزایش چشمگیری داشته است. این امر به معنای کاهش سریع منابع انرژی فسیلی و به دنبال آن، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی است. همچنین این امر باعث افزایش سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است که جرمه‌های بسیار سنگینی را برای کشورها به همراه دارد [۱]. بنابراین

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: hamid.radmanesh@aut.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

مذاب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه [۱۳]، عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی مستقیم با یک ساختار جدید کاتالیست، بررسی شده است. در مطالعات [۱۴] و [۱۵] مدل سازی جهت ارزیابی توزیع حرارت در پیل سوختی کربنات مذاب انجام شده است. مدل های مختصر شده تخمینی از عملکرد پیل سوختی به دست می آورند که دقت متوسطی داشته، مدل های پیچیده حلقه های محاسباتی تکرار شونده زیادی دارند که زمان انجام محاسبات را طولانی می کنند [۱۶]. بنابراین توسعه یک مدل با دقت بالا و سرعت پاسخ دهی مناسب که نتایج مطلوب و قابل اطمینانی داشته باشد، از جمله اهداف این پژوهش است.

با توجه به دمای بالای پیل سوختی کربنات مذاب می توان از بهسازی داخلی برای تبدیل سوخت های مختلف به هیدروژن استفاده کرد. در مطالعات [۵]، [۱۷] و [۱۸] از پیل سوختی با بهسازی داخلی استفاده شده است. از سوی دیگر، در مطالعات [۱۹]، [۲۰] و [۲۱] از یک منبع خارجی برای تأمین بخار و حرارت مورد نیاز برای بهسازی استفاده شده است. استفاده از بهسازگر داخلی منجر به افزایش کارایی سیستم می شود و نیاز به منبع خارجی را جهت تأمین حرارت کاهش می دهد. پیل سوختی مورد استفاده در این تحقیق، دارای بهسازگر داخلی غیرمستقیم است. سیستم های با بهسازگر داخلی، به دو دسته مستقیم^۶ و غیرمستقیم^۷ تقسیم می شوند [۲۲]. در واکنش بهسازی مستقیم، سوخت خام و بخار آب به آند پیل سوختی وارد می شوند که در آن سه واکنش بهسازی، شیفت^۸ و واکنش الکتروشیمیایی کلی پیل سوختی با هم صورت می گیرد. در سیستم های با بهسازی داخلی غیرمستقیم، برخلاف روش قبل، ابتدا سوخت و بخار آب قبل از ورود به آند، در یک محفظه جداگانه با هم واکنش می دهند و از طریق واکنش های بهسازی و شیفت، هیدروژن تولید می شود، سپس این هیدروژن به آند پیل سوختی وارد می شود. از مهم ترین ویژگی سیستم با بهسازگر داخلی غیرمستقیم، تعادل گرمایی بین واکنش های گرماده داخل پیل سوختی و واکنش گرماگیر بهسازی است. بنابراین خنک کاری لازم برای کاتالیست پیل سوختی به حداقل می رسد و کاتالیست

سوختی در مقایسه با فناوری های رایج تولید توان دارای بازده الکتریکی بالاتری هستند [۴]. در میان پیل های سوختی، پیل سوختی کربنات مذاب^۱ فناوری اثبات شده ای است که همانند پیل سوختی اکسید جامد^۲، از جمله پیل های سوختی دما بالا (بالای ۶۰۰°C) است. این دمای عملکرد بالا امکان استفاده از بهسازگر^۳ داخلی را فراهم می کند؛ بنابراین می توان از سوخت های مختلف از جمله متان و گاز زیستی^۴ در پیل سوختی استفاده کرد [۵]. از سوی دیگر، دمای عملکرد بالا منجر به سرعت بخشیدن به واکنش های الکتروشیمیایی داخل پیل سوختی می شود و در نتیجه، نیاز به استفاده از کاتالیست های پرهزینه را کاهش می دهد [۶]. از دیگر مزایای پیل سوختی کربنات مذاب، امکان کاربرد به عنوان جداساز دی اکسید کربن^۵ جریان گاز های خروجی تجهیزاتی مانند توربین گازی، بویلر و... است که این امر، کاربرد این فناوری را جذاب تر می سازد [۷].

در مقایسه با پیل سوختی اکسید جامد، مطالعات کمتری در زمینه پیل سوختی کربنات مذاب صورت گرفته است. گروه های مختلفی در زمینه پیشبرد فناوری پیل سوختی کربنات مذاب تلاش کرده اند، از جمله این گروه ها می توان به انستیتو فناوری ایلینویز، دانشگاه دلف و انستیتو فناوری گازی اشاره کرد. بیشترین تحقیقات اخیر در زمینه پیل سوختی کربنات مذاب توسط کشورهای ژاپن و آمریکا انجام شده است. در حال حاضر، پیل سوختی کربنات مذاب با ابعاد مختلف ۲۵۰kW، ۱.۵MW و ۳MW در حال کار و موجود است [۶]. با این حال، فناوری پیل سوختی کربنات مذاب در مراحل تکامل است و از لحاظ تجاری شدن، توانایی رقابت با فناوری های رایج تولید توان ندارد [۸].

مطالعات مختلفی در زمینه مدل سازی پیل سوختی کربنات مذاب صورت گرفته است. طیف پیچیدگی این مدل ها از مدل های ساده و مختصر شده تا مدل های سه بعدی پیل سوختی است [۹]. در مطالعه [۱۰] یک مدل صفر بعدی با هدف کاهش پارامترهای مورد نیاز پیل سوختی کربنات مذاب، توسعه داده شده است. در مطالعات [۱۱] و [۱۲] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و محاسبه توزیع سه بعدی پارامترهای اصلی، عملکرد پیل سوختی کربنات

⁵ CO2 Capturing

⁶ Direct Internal Reforming (DIR)

⁷ Indirect Internal Reforming (IIR)

⁸ Water-Gas Shift Reaction

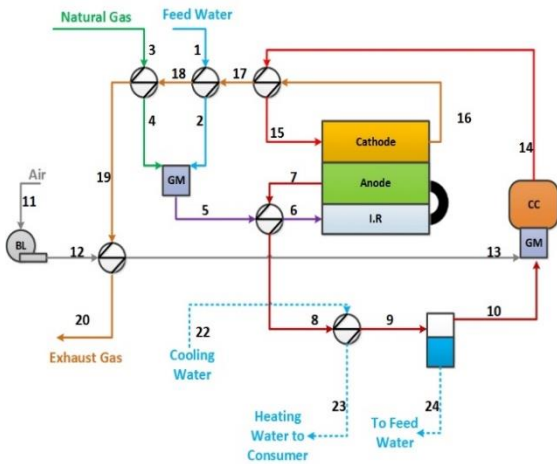
¹ Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

² Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

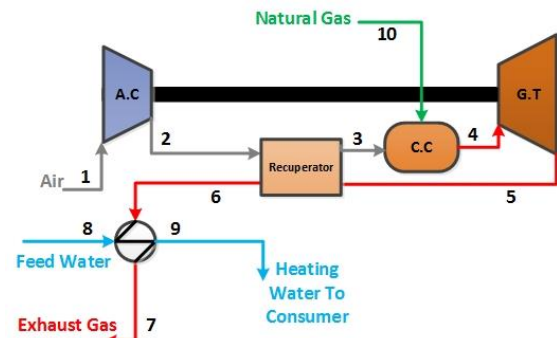
³ Reformer

⁴ Biogas

خروجی میکروتوربین نیز برای تأمین آب گرم مصرفی استفاده می‌شود (جریان ۹).



شکل ۱- چرخه پیل سوختی کربنات مذاب



شکل ۲- چرخه میکروتوربین گازی

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و روابط حاکم بر هر یک از اجزا، مدل هر چرخه توسعه داده شده، ارزیابی‌های مختلف روی آن‌ها صورت می‌گیرد.

۳- روابط حاکم بر مدل‌سازی

۳-۱- پیل سوختی کربنات مذاب

نحوه عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب به این صورت است که هیدروژن به قطب آند و هوا و دی‌اکسیدکربن به قطب کاتد اعمال می‌شود تا واکنش‌های شیمیایی داخل پیل سوختی صورت گرفته، الکتریسیته و حرارت تولید شود. با توجه به بالابودن دمای عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب، می‌توان از سوخت‌های هیدروکربنی مختلفی نظیر متان، اتان و پروپان در پیل سوختی کربنات مذاب استفاده کرد. قبل از ورود سوخت‌های هیدروکربنی به آند، می‌توان از بهسازی داخلی بهره برد و با استفاده از بخار آب، سوخت را به هیدروژن تبدیل کرد. با توجه به گرماگیر بودن واکنش‌های بهسازی، گرمای موردنیاز این واکنش از طریق واکنش‌های

از اثرات مسموم‌کننده بخار الکترولیت در امان می‌ماند [۲۳].

با توجه به اینکه فناوری‌های رایج تبدیل انرژی مانند توربین گازی به بلوغ کافی رسیده‌اند، مطالعه بیشتر پیل‌های سوختی از جمله پیل سوختی کربنات مذاب و مقایسه عملکرد و مزایای آن‌ها با فناوری‌های رایج، می‌تواند به بلوغ بیشتر و کاربرد وسیع‌تر این فناوری‌ها کمک کند. بنابراین در این پژوهش مدل پیل سوختی کربنات مذاب، مرحله به مرحله توسعه داده و عملکرد آن از لحاظ فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی با فناوری رایج میکروتوربین گازی مقایسه شده است.

۲- چرخه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت

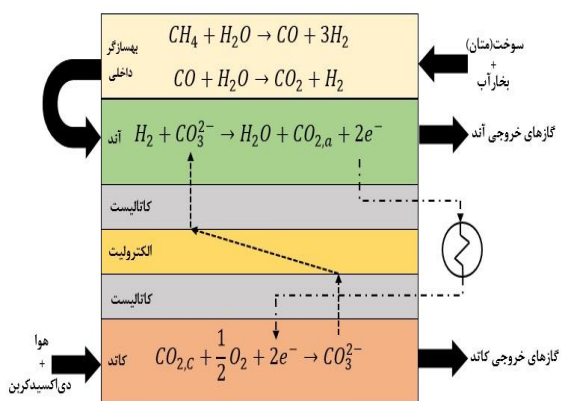
۲-۱- چرخه پیل سوختی کربنات مذاب

چرخه مربوط به استفاده از پیل سوختی کربنات مذاب، در شکل (۱) نشان داده شده است. در این چرخه، با استفاده از جریان خروجی کاتد و آند، آب به بخار آب تبدیل و همراه با سوخت تا دمای ورودی پیل سوختی پیش‌گرم می‌شوند (جریان ۶). مخلوط سوخت و بخار آب بعد از ورود به بهسازی داخلی، وارد آند شده، پس از واکنش از آند خارج می‌شوند. در خروجی آند (جریان ۷)، مقداری گازهای متان، هیدروژن و کربن مونوکسید بدون واکنش وجود دارد. با عبور جریان ۹ از مبدل حرارتی، بخار آب موجود در این جریان به آب تبدیل و جدا شده، مجدداً به منظور استفاده در جریان ۱ از آن استفاده می‌شود. گازهای بدون واکنش خروجی آند (جریان ۱۰) با هوا (جریان ۱۳) مخلوط و وارد محفظه احتراق شده، پس از احتراق، به ورودی کاتد فرستاده می‌شوند (جریان ۱۴). از جریان خروجی کاتد برای پیش‌گرم کردن جریان‌ات سیکل و از جریان خروجی آند به منظور تأمین آب گرم مصرفی استفاده می‌شود (جریان ۲۳).

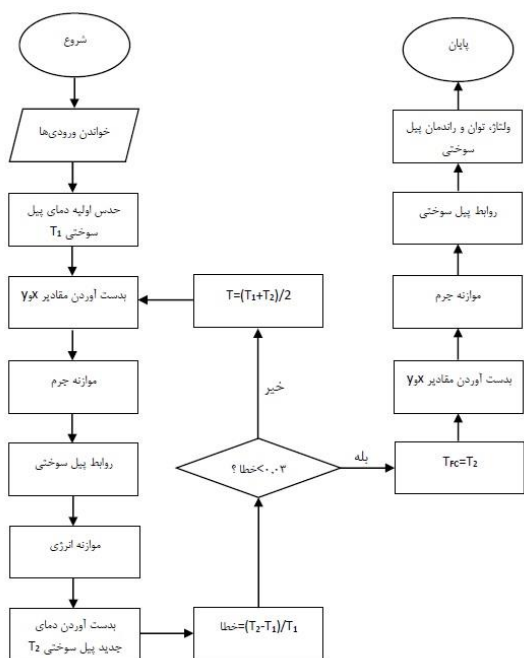
۲-۲- چرخه میکروتوربین گازی

چرخه مربوط به میکروتوربین گازی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این چرخه، هوا ابتدا وارد کمپرسور شده، فشرده می‌شود (جریان ۱). جریان خروجی از کمپرسور با عبور از بازیاب حرارتی، توسط جریان خروجی میکروتوربین (جریان ۵) پیش‌گرم و به همراه سوخت (جریان ۱۰) وارد محفظه احتراق می‌شود. پس از احتراق، جریان ۴ در میکروتوربین منبسط و منجر به تولید توان می‌گردد. از جریان

سوختی، دمای خروجی ثانویه پیل سوختی به دست می آید. با مقایسه این دما با دمای فرضی اولیه و حداقل سازی خطا در یک حلقه تکرار، دمای صحیح عملکرد پیل سوختی حاصل می شود. در ادامه، هریک از مراحل مدل سازی ارائه شده است.



شکل ۳- شماتیک عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازگر داخلی غیرمستقیم



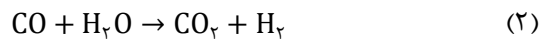
شکل ۴- نمودار مراحل مدل سازی پیل سوختی کربنات مذاب

۳-۱-۱- فرض های مدل

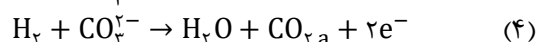
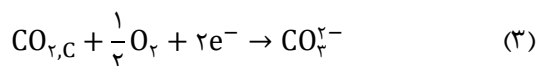
فرض های به کار گرفته شده در توسعه مدل پیل سوختی کربنات مذاب، به شرح زیر است:

- رفتار همه گازها به صورت گاز ایدئال است.
- همه واکنش ها در تعادل هستند.
- افت فشار در پیل سوختی در نظر گرفته نمی شود.
- دمای کاتد و آند یکسان در نظر گرفته می شود.

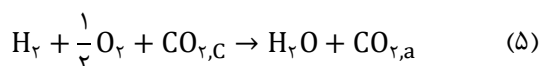
الکتروشیمیایی داخل پیل سوختی که گرماده هستند، تأمین می شود. با در نظر گرفتن متان به عنوان سوخت ورودی، واکنش های اصلی که در بهسازگر اتفاق می افتد، واکنش بهسازگی و واکنش شیفت به ترتیب به صورت زیر هستند [۲۴]:



واکنش بهسازگی به شدت گرماگیر و واکنش شیفت، گرماده است. واکنش های دیگر پیل سوختی، نیم واکنش های کاتد و آند به ترتیب به صورت زیر هستند [۲۵]:



در شکل (۳)، شماتیک عملکرد پیل سوختی کربنات مذاب و واکنش های پیل سوختی نشان داده شده است. در قطب کاتد، دی اکسید کربن با اکسیژن ترکیب شده، یون کربنات تولید می شود که منجر به حفظ غلظت الکترولیت می گردد. یون کربنات از طریق الکترولیت از کاتد به آند منتقل می شود. در قطب آند، هیدروژن تولید شده در واکنش های بهسازگی و شیفت با یون کربنات ترکیب شده، آب، دی اکسید کربن و الکترون تشکیل می شود. الکترون با عبور از یک مدار خارجی از آند به کاتد منتقل و الکتروسیته تولید می گردد. با تلفیق نیم واکنش های آند و کاتد، واکنش الکتروشیمیایی کلی درون پیل سوختی به صورت زیر به دست می آید:



واکنش (۵) در واقع، واکنش احتراق هیدروژن است که با انتقال دی اکسید کربن از کاتد به آند همراه است [۲۶]. این واکنش، گرماده است و از گرمای حاصل از آن می توان برای تأمین گرمای مورد نیاز واکنش (۱) استفاده کرد.

نمودار مربوط به مراحل مدل سازی پیل سوختی کربنات مذاب در شکل (۴) آمده است. به دست آوردن دمای کارکرد پیل سوختی، یکی از چالش های مدل سازی پیل سوختی کربنات مذاب است. برای این کار، ابتدا یک دمای فرضی برای خروجی پیل سوختی در نظر گرفته می شود و مراحل مدل سازی پیل سوختی تا به دست آوردن توان پیل سوختی ادامه می یابد. بعد از آن، با استفاده از موازنه انرژی حول پیل

$$K_{P,S} = \frac{y(3x + y)}{(x - y)(\dot{n}_{H_2O}^0 - x - y)} \quad (11)$$

در روابط بالا U_f ، $\dot{n}_{CH_4}^0$ و P_{MCFC} به ترتیب ضریب به کارگیری هیدروژن، دبی مولی سوخت ورودی و فشار پیل سوختی هستند. $\dot{n}_{H_2O}^0$ دبی مولی بخار آب ورودی به بهسازگر است که از طریق نسبت بخار به سوخت به صورت زیر به دست می آید:

$$S/C = \frac{\dot{n}_{H_2O}^0}{\dot{n}_{CH_4}^0} \quad (12)$$

با حل همزمان روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱)، ترکیب گازهای خروجی آند و به تبع آن فشارهای جزئی هریک از گازها به دست می آید. نسبت مول تعادلی $(\frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}})$ هریک از گازهای خروجی آند به صورت زیر است:

$$X_{eq}^{CH_4} = \frac{\dot{n}_{CH_4}^0 - x}{\dot{n}_{out,a}} \quad (13)$$

$$X_{eq}^{H_2} = \frac{3x + y - z}{\dot{n}_{out,a}} \quad (14)$$

$$X_{eq}^{H_2O} = \frac{\dot{n}_{H_2O}^0 - x - y + z}{\dot{n}_{out,a}} \quad (15)$$

$$X_{eq}^{CO} = \frac{x - y}{\dot{n}_{out,a}} \quad (16)$$

$$X_{eq}^{CO_2} = \frac{y + z}{\dot{n}_{out,a}} \quad (17)$$

که در روابط بالا $\dot{n}_{out,a}$ دبی مولی جریان خروجی آند به صورت زیر است:

$$\dot{n}_{out,a} = \dot{n}_{CH_4}^0 + \dot{n}_{H_2O}^0 + 3x + z \quad (18)$$

فشار جزئی گازها از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_i = X_{eq}^i \times P_{MCFC} \quad (19)$$

همچنین نسبت مول تعادلی هریک از گازهای خروجی کاتد به صورت زیر به دست می آید:

$$X_{eq}^{O_2} = \frac{(\frac{z}{2U_{O_2}} - \frac{z}{2})}{\dot{n}_{out,C}} \quad (20)$$

$$X_{eq}^{N_2} = \frac{(\frac{z}{2U_{O_2}} \times \frac{.79}{.21})}{\dot{n}_{out,C}} \quad (21)$$

$$X_{eq}^{CO_2} = \frac{(\frac{z}{U_{CO_2}} - z)}{\dot{n}_{out,C}} \quad (22)$$

- شرایط کارکرد پیل سوختی پایا است.
- گاز متان به عنوان سوخت ورودی است.

۳-۱-۲- معادلات بهسازی

با در نظر گرفتن ثابت تعادل واکنش های بهسازی و شیفت، مقدار تبدیل متان و مونوکسیدکربن به هیدروژن به دست می آید. با توجه به واکنش های (۱) و (۲)، ثابت تعادل واکنش های بهسازی و شیفت که تابعی از فشارهای جزئی گاز هستند، به ترتیب به صورت زیر است:

$$K_{P,r} = \frac{P_{CO} P_{H_2}^2}{P_{CH_4} P_{H_2O}} \quad (6)$$

$$K_{P,s} = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} \quad (7)$$

از سوی دیگر، ثابت های تعادل از طریق رابطه زیر که وابسته به دما است، به دست می آید [۲۷]:

$$\text{Log}(K_p) = AT^{\epsilon} + BT^{\gamma} + CT^{\delta} + DT + E \quad (8)$$

ضرایب A, B, C, D, E برای واکنش های بهسازی و شیفت، در جدول (۱) آمده است [۲۷]:

جدول ۱- ضرایب ثابت تعادل واکنش های بهسازی و شیفت

واکنش شیفت	واکنش بهسازی	ضرایب
$5,47301 \times 10^{-12}$	$-2,63121 \times 10^{-11}$	A
$-2,57479 \times 10^{-8}$	$1,24065 \times 10^{-7}$	B
$4,63742 \times 10^{-5}$	$-2,25232 \times 10^{-4}$	C
$-3,91500 \times 10^{-2}$	$1,95028 \times 10^{-1}$	D
$1,32097 \times 10$	$-6,61395 \times 10$	E

با داشتن دمای عملکرد پیل سوختی برحسب کلون و تساوای رابطه (۸) با روابط (۶) و (۷)، می توان ترکیب گازهای خروجی از پیل سوختی را به دست آورد. با در نظر گرفتن x ، y و z به ترتیب برابر با دبی مولی تبدیل متان به هیدروژن در رابطه (۱)، دبی مولی تبدیل مونوکسیدکربن به هیدروژن در رابطه (۲) و دبی مصرفی هیدروژن در رابطه (۵)، داریم:

$$K_{P,r} = \quad (9)$$

$$K_{P,S} = \frac{(x - y)(3x + y)^2 \times P_{MCFC}^r}{(\dot{n}_{CH_4}^0 - x)(\dot{n}_{H_2O}^0 - x - y)(\dot{n}_{CH_4}^0 + \dot{n}_{H_2O}^0 + 3x)^2} \quad (10)$$

$$R_c = 7,505 \times 10^{-10} \times \exp\left(\frac{E_{act,c}}{RT}\right) \times P_{O_2}^{-0,42} \times P_{CO_2}^{-0,9} \quad (32)$$

$$R_{ohm} = 0,5 \times 10^{-4} \times \exp\left[3,16\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923}\right)\right] \quad (33)$$

که در روابط بالا:

P_k فشار جزئی گازها در آند و کاتد است.

ΔG تابع انرژی آزاد گیبس برحسب $J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ بوده که به خواص ترمودینامیکی گازها وابسته است.

$E_{act,a}$ انرژی فعال سازی آند و به مقدار $53500 J \text{ mol}^{-1}$ است.

$E_{act,c}$ انرژی فعال سازی کاتد و به مقدار $77229 J \text{ mol}^{-1}$ است.

T دمای سلول برحسب درجه کلوین است که مقدار متوسط دمای ورودی و خروجی در نظر گرفته می شود.

R ثابت جهانی گازها با مقدار $8/314 J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ است. با محاسبه مقاومت ها و ولتاژ پیل سوختی، توان تولیدی و بازده پیل سوختی به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{W}_{FC,DC} = I \times V_{cell} \quad (34)$$

$$\dot{W}_{FC,AC} = \eta_{inv} \times \dot{W}_{FC,DC} \quad (35)$$

$$\eta_{FC} = \frac{\dot{W}_{FC,AC}}{\dot{n}_{CH_4}^0 \times LHV} \quad (36)$$

که در روابط بالا η_{inv} و LHV به ترتیب بازده تبدیل جریان مستقیم به متناوب و ارزش حرارتی پایین سوخت است.

برای موازنه انرژی، پیل سوختی و به سازگر داخلی را به عنوان حجم کنترل در حالت پایا در نظر می گیریم. با استفاده از قانون اول ترمودینامیک، بین جریان های ورود و خروج انرژی، حرارت و توان تولید شده، موازنه انرژی برقرار می شود. رابطه زیر، موازنه انرژی حول پیل سوختی را نشان می دهد:

$$\sum_i C_{P,i} \dot{n}_{out,i} T_{out} - \sum_i C_{P,i} \dot{n}_{in,i} T_{in} = \dot{Q}_{net} - \dot{W}_{FC,DC} \quad (37)$$

در رابطه (۳۷)، \dot{Q}_{net} مجموع حرارت های مورد نیاز و تولید شده در پیل سوختی به واسطه واکنش های بهسازی، شیفت و واکنش های الکتروشیمیایی داخل پیل سوختی است که به ترتیب در زیر آمده اند [۴]:

که در روابط بالا U_{O_2} و U_{CO_2} به ترتیب ضرایب به کارگیری اکسیدانت های اکسیژن و دی اکسید کربن و $\dot{n}_{out,C}$ دبی مولی جریان خروجی کاتد به صورت زیر است:

$$U_{O_2} = \frac{(z/z)}{O_{2,in,c}} \quad (23)$$

$$U_{CO_2} = \frac{z}{CO_{2,in,c}} \quad (24)$$

$$\dot{n}_{out,C} = z \left(\frac{4,76}{2U_{O_2}} + \frac{1}{U_{CO_2}} - 1,5 \right) \quad (25)$$

۳-۱-۳- معادلات ولتاژ و توان پیل سوختی

با به دست آمدن مقدار z ، جریان پیل سوختی به صورت زیر به دست می آید [۲۸]:

$$I = 2Fz \quad (26)$$

$$I = iA \quad (27)$$

در رابطه (۲۶)، F ثابت فارادی با مقدار 96487 کولن بر مول است. در رابطه (۲۷)، i چگالی جریان برحسب آمپر بر مترمربع و A سطح فعال پیل سوختی برحسب مترمربع است. با استفاده از منحنی قطبش پیل سوختی، می توان چگالی جریان مشخصی را انتخاب کرد. برای آن چگالی جریان، سطح فعال پیل سوختی با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) به دست می آید. ولتاژ کاری پیل سوختی برحسب ولت از طریق رابطه زیر به دست می آید [۲۹]:

$$V_{cell} = E_{Nernst} - (R_a + R_c + R_{ohm}) \times i \quad (28)$$

در رابطه (۲۸)، E_{Nernst} بیشینه ولتاژ قابل دستیابی بازگشت پذیر در پیل سوختی کربنات مذاب است. مقاومت های آند، کاتد و اهمیک باعث کاهش ولتاژ برگشت پذیر نرنست می شوند. روابط مربوط به ولتاژ برگشت پذیر نرنست برحسب ولت و مقاومت های آند، کاتد و اهمیک برحسب اهم بر مترمربع در زیر آمده است [۲۹]:

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2,a} \times (P_{O_2,c})^{0,5} \times P_{CO_2,c}}{P_{H_2O,a} \times P_{CO_2,a}} \right] \quad (29)$$

$$\Delta G = 242000 - 45,8 \times T \quad (30)$$

$$R_a = 2,27 \times 10^{-9} \times \exp\left(\frac{E_{act,a}}{RT}\right) \times P_{H_2}^{-0,42} \times P_{CO_2}^{-0,17} \times P_{H_2O}^{-1} \quad (31)$$

دمای گازهای خروجی از محفظه احتراق، با استفاده از موازنه انرژی حول محفظه احتراق به صورت زیر به دست می آید [۳۳]:

$$\sum_{in} \dot{n}_i \bar{h}_i = \sum_{out} \dot{n}_i \bar{h}_i \quad (48)$$

که در آن داریم:

$$\sum_{in} \dot{n}_i \bar{h}_i = \sum_{in} \dot{n}_i (\Delta H_{f,98,i}^0 + \int_{298}^{T_{in,i}} C_{p,i} dT) \quad (49)$$

$$\sum_{out} \dot{n}_i \bar{h}_i = \sum_{out} \dot{n}_i (\Delta H_{f,98,i}^0 + \int_{298}^{T_{out}} C_{p,i} dT) \quad (50)$$

در روابط بالا، $\Delta H_{f,98,i}^0$ آنتالپی استاندارد تشکیل هریک از گازها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد است.

۳-۴- میکرو توربین گازی

گازهای داغ خروجی از محفظه احتراق در ادامه وارد میکرو توربین شده، منجر به تولید توان می شوند. بخشی از توان الکتریکی تولیدشده، توان مصرفی تجهیزات جانبی مثل کمپرسور را تأمین می کند و مقدار توان باقی مانده نیز به عنوان توان خالص خروجی، مورد استفاده قرار می گیرد. با داشتن دمای ورودی و فشار ورودی و خروجی توربین، دمای آیزنتروپیک خروجی توربین از رابطه زیر به دست می آید [۳۱]:

$$\frac{T_{\Delta S}}{T_f} = \left(\frac{P_{\Delta}}{P_f}\right)^{\frac{\gamma_g-1}{\gamma_g}} \quad (51)$$

که در رابطه بالا، γ_g نسبت ظرفیت گرمایی جریان ورودی توربین است که از رابطه زیر به دست می آید [۳۰]:

$$\gamma_g = 1,4197 - (5 \times 10^{-5})T - (3 \times 10^{-8})T^2 \quad (52)$$

با استفاده از بازده آیزنتروپیک توربین، از رابطه زیر دمای واقعی خروجی توربین به دست می آید:

$$\eta_{is,T} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_{T_s}} = \frac{h_f - h_{\Delta}}{h_f - h_{\Delta S}} = \frac{T_f - T_{\Delta}}{T_f - T_{\Delta S}} \quad (53)$$

$$\dot{Q}_r = x(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (38)$$

$$\dot{Q}_{sh} = y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (39)$$

$$\dot{Q}_{elec} = z(\bar{h}_{H_2O} - \bar{h}_{H_2} - 0,5\bar{h}_{O_2}) \quad (40)$$

$$\dot{Q}_{net} = |\dot{Q}_{elec}| + |\dot{Q}_{sh}| - \dot{Q}_r \quad (41)$$

که در روابط بالا \bar{h} آنتالپی مخصوص بر حسب kJ/mol است.

پس از حل معادله (۳۷)، یک دمای خروجی برای پیل سوختی به دست می آید که با مقایسه این دما با دمای حدس زده شده اولیه و کمینه کردن خطا در یک حلقه تکرار، دمای نهایی پیل سوختی به دست می آید.

۳-۲- کمپرسور هوا و دمنده

با داشتن نسبت فشار و بازده آیزنتروپیک کمپرسور، می توان دمای هوای خروجی و کار مورد نیاز کمپرسور را به دست آورد [۳۰]. با در نظر گرفتن فرایند به صورت تک آنترابی، دمای آیزنتروپیک خروجی کمپرسور به صورت زیر به دست می آید [۳۱]:

$$\frac{T_{rS}}{T_1} = \left(\frac{P_r}{P_1}\right)^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}} = (r_{p,a})^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}} \quad (42)$$

که در آن γ_a نسبت ظرفیت گرمایی هوا و برابر با ۱,۴ است. با داشتن بازده تک آنترابی کمپرسور، از طریق رابطه زیر، دمای واقعی خروجی کمپرسور به دست می آید:

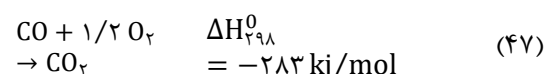
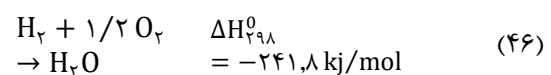
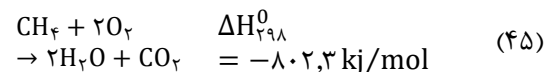
$$\eta_{is,c} = \frac{\dot{W}_{cs}}{\dot{W}_c} = \frac{h_{rS} - h_1}{h_r - h_1} = \frac{T_{rS} - T_1}{T_r - T_1} \quad (43)$$

و برای کار مورد نیاز کمپرسور داریم:

$$\dot{W}_c = \dot{n}_1 (h_r - h_1) \quad (44)$$

۳-۳- محفظه احتراق

واکنش های احتراق متان، هیدروژن و کربن مونوکسید به صورت زیر است [۳۲]:



بازده بازیاب حرارتی در چرخه میکروتوربین گازی از رابطه زیر به دست می آید [۳۰]:

$$\varepsilon_{\text{Recup}} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \quad (60)$$

با نوشتن موازنه انرژی حول بازیاب، می توان دمای جریان ۶ را از رابطه زیر به دست آورد:

$$\dot{n}_5(h_5 - h_6) = \dot{n}_2(h_3 - h_2) \quad (61)$$

از گرمای گازهای خروجی بازیاب حرارتی (جریان ۶) برای تأمین آب گرم مصرفی استفاده می شود.

۴- روابط اقتصادی

هدف از تحلیل اقتصادی در این پژوهش، به دست آوردن هزینه هم تراز شده^۲ تولید برق (هزینه هر کیلووات ساعت برق تولیدی) توسط هر چرخه است. برای این منظور، هزینه سرمایه گذاری، تعمیرات، هزینه عملیاتی و هزینه های زیست محیطی در هر چرخه لحاظ می شود. هزینه هریک از اجزای سیستم، به پارامترهای طراحی و عملیاتی آن بستگی دارد. هزینه اولیه هریک از تجهیزات در جدول (۲) آمده است.

به منظور ارزیابی هزینه سرمایه گذاری بر واحد زمان (۱) سال، کل هزینه ها را به سال پایه تبدیل می کنیم [۱۹]:

$$Z_k = \sum_i (Z_i) \times \text{CRF} \times \varphi \quad (62)$$

که در آن:

Z_k هزینه سالانه (\$/year)، Z_i هزینه سرمایه گذاری هریک از اجزاء سیستم (\$)، φ ضریب تعمیرات و CRF ضریب بازیابی سرمایه^۳ است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (63)$$

که در آن i نرخ تنزیل و n طول عمر سیستم است. هزینه عملیاتی سالانه (\$/year) برابر با هزینه سوخت است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Z_f = c_f \times \text{LHV} \times \dot{m}_f \times 3600 \times N \quad (64)$$

که در آن، c_f هزینه واحد سوخت (\$/MJ)، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت (kJ/kg)، \dot{m}_f دبی جرمی سوخت

در نهایت، با استفاده از رابطه زیر، توان تولیدی میکروتوربین به دست می آید:

$$\dot{W}_T = \dot{n}_f(h_f - h_5) \quad (54)$$

بازده الکتریکی چرخه میکرو توربین از رابطه زیر به دست می آید:

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{n}_{\text{fuel}} \times \text{LHV}} \quad (55)$$

که در آن:

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_T - \dot{W}_C \quad (56)$$

۳-۵- مبدل های حرارتی

مبدل ها به گونه ای انتخاب می شوند که دمای مورد نیاز جریان ها توسط سیکل تأمین گردد و نیاز به حرارت خارجی نباشد. برای این منظور از مبدل حرارتی نوع فشرده^۱ استفاده می شود که موازنه انرژی در آن به صورت زیر است [۳۴]:

$$Q = n_1 C_{p,1} (T_{1,\text{in}} - T_{1,\text{out}}) \\ = n_2 C_{p,2} (T_{2,\text{out}} - T_{2,\text{in}}) \quad (57)$$

$Q =$

$$UA \frac{(T_{1,\text{in}} - T_{2,\text{out}}) - (T_{1,\text{out}} - T_{2,\text{in}})}{\ln\{(T_{1,\text{in}} - T_{2,\text{out}})/(T_{1,\text{out}} - T_{2,\text{in}})\}} \quad (58)$$

که در روابط بالا [۳۵]:

جریان های ۱ و ۲ به ترتیب جریان های دمابالا و دمابالین هستند.

U ضریب انتقال حرارت کلی است ($\text{W/m}^2\text{k}$).

A سطح مؤثر مبدل حرارتی است.

در این سیستم، از مبدل های حرارتی برای تولید آب گرم مصرفی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد نیز استفاده می گردد که این انتقال حرارت به عنوان حرارت مفید سیستم (\dot{Q}_{use}) در نظر گرفته می شود. بنابراین، بازده حرارتی هریک از چرخه ها از رابطه زیر به دست می آید [۳۱]:

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{\dot{Q}_{\text{use}}}{\dot{n}_{\text{fuel}} \times \text{LHV}} \quad (59)$$

۳-۶- بازیاب حرارتی

³ Capital Recovery Factor (CRF)

¹ Compact Type

² Levelized Unit Cost

سیستم اضافه می‌شود. اگر نرخ تنزیل برابر با ۸٪، عمر سیستم برابر با ۲۵ سال و عمر پیل سوختی ۵ سال باشد، با در نظر گرفتن هزینه عملیاتی به میزان ۵٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پیل سوختی، جایگذاری پیل سوختی به صورت هر ۵ سال یک بار در سیستم لحاظ می‌شود [۴۰]. در نهایت، هزینه هم‌تراز شده تولید برق در هر چرخه، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$COE = \frac{Z_{tot}}{N \times \dot{W}_{net}} (\$/kWh) \quad (67)$$

۵- اعتبار سنجی

۵-۱- پیل سوختی کربنات مذاب

به منظور اعتبارسنجی مدل پیل سوختی کربنات مذاب، مطالعه کامپاناری و همکاران [۲۸] به عنوان مرجع قرار گرفت و نتایج حاصل از این مدل با مطالعه مرجع ارزیابی شد. با استفاده از داده‌های مطالعه مرجع به عنوان ورودی مدل، پارامترهای ولتاژ، توان، دما و سطح فعال پیل سوختی به عنوان خروجی مدل به دست آمد و با مطالعه مرجع مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول (۳) نشان داده شده است:

جدول ۳- مقایسه نتایج مدل پیل سوختی با مطالعه مرجع [۲۸]

پارامترها	مطالعه مرجع	مدل حاضر	خطا (%)
V (v)	۰/۶۹۹	۰/۶۹۳۶	-۰/۷۷
$\dot{W}_{FC,AC}$ (kw)	۸۸۰۰۰	۸۷۸۲۰	-۰/۲
T _{FC} (°C)	۶۴۲/۲	۶۵۳/۰۵	۱/۶۸
A _{FC} (m ²)	۸۹۸۹۰	۸۹۷۹۰	-۰/۱۱

همچنین نمودار قطبش مطالعه مرجع و مطالعه حاضر در شکل (۵) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جدول (۳)، درصد خطای پائینی بین خروجی‌های پژوهش مرجع و مدل حاضر وجود دارد. از سوی دیگر با توجه به شکل (۵)، تطابق مناسبی بین نمودار قطبش پژوهش حاضر و مرجع وجود دارد.

۵-۲- میکرو توربین گازی

به منظور اعتبارسنجی نتایج سیکل توربین گازی، پژوهش [۳۸] به عنوان مرجع انتخاب و نتیجه خروجی مدل با این

(kg/s) و N تعداد ساعات عملکرد سیستم در سال است. با در نظر گرفتن گاز CO_۲ به عنوان آلاینده خروجی از چرخه‌ها، هزینه خسارت سالانه ناشی از اثرات زیست‌محیطی انتشار آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Z_{env} = c_{CO_2} \times \dot{m}_{CO_2} \times ۳۶۰۰ \times N \quad (68)$$

که در آن، c_{CO_۲} هزینه خسارت انتشار CO_۲ (\$/kg) و \dot{m}_{CO_2} دبی جرمی CO_۲ خروجی از هر چرخه (kg/s) است. با توجه به هزینه‌های مطرح‌شده، هزینه سالانه کل به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Z_{tot} = Z_k + Z_f + Z_{env} \quad (66)$$

جدول ۲- تابع هزینه اولیه هریک از تجهیزات چرخه‌ها

مرجع	تابع قیمت (\$)	تجهیز
[۲۶]	$Z_{MCFC} = ۵۲۳۷ \times \dot{W}_{MCFC}$	پیل سوختی با بهسازی داخلی
[۳۷]	$Z_{CC} = \left(\frac{۴۶۰ \cdot \lambda \dot{m}_{CC}}{۰ \cdot ۹۹۵ - P_{CC}} \right) \times [1 + \exp(۰ \cdot ۱۸ T_{CC} - ۲۶ \cdot ۴)]$	محفظه احتراق
[۳۳]	$Z_{BL} = ۹۱۵۶۲ \times \left(\frac{\dot{W}_{BL}}{۴۴۵} \right)^{۰ \cdot ۶۷}$	دمنده
[۳۷]	$Z_{HEX} = ۴۱۲۲ \times (A_{HEX})^{۰ \cdot ۶}$	مبدل‌های حرارتی
[۳۸]	$Z_{HRSG} = \left[\left(\frac{\dot{Q}_{PH}}{(\Delta TLM)_{PH}} \right)^{۰ \cdot ۸} + \left(\frac{\dot{Q}_{EV}}{(\Delta TLM)_{EV}} \right)^{۰ \cdot ۸} \right] + ۱۱۸۲ \cdot \dot{m}_{st} + ۶۵۸ \dot{m}_g$	مبدل تولید بخار
[۳۳]	$Z_{inv} = ۱۰۰۰۰۰ \times \left(\frac{\dot{W}_{MCFC}}{۵۰} \right)^{۰ \cdot ۷}$	مبدل جریان مستقیم
[۱۹]	$Z_{Aux} = ۰ \cdot ۱ \times Z_{MCFC}$	تجهیزات کمکی پیل سوختی
[۳۳]	$Z_C = ۹۱۵۶۲ \times \left(\frac{\dot{W}_C}{۴۴۵} \right)^{۰ \cdot ۶۷}$	کمپرسور
[۳۹]	$Z_{Recup} = ۲۲۹۰ \times (A_{Recup})^{۰ \cdot ۶}$	بازیاب حرارتی
[۳۳]	$Z_T = W_T [1318.5 - 98.328 \ln(W_T)] - W_C$	میکروتوربین
[۳۳]	$Z_{Gen} = ۶۰ (W_T - W_C)^{۰ \cdot ۹۵}$	ژنراتور

از آنجا که پیل سوختی، عمر کوتاهی نسبت به سایر اجزا دارد، در طول عمر سیستم باید مجدداً جایگذاری شود. این جایگذاری به صورت یک هزینه عملیاتی سالانه به هزینه‌های

حساسیت های انجام شده، به منظور برقراری ارتباط مناسب بین بازده، توان خروجی و تأمین حرارت مورد نیاز سیکل، دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد به عنوان دمای مطلوب میکروتوربین و نسبت فشار کمپرسور ۵ به عنوان نسبت فشار مطلوب سیستم، در نظر گرفته می شود. با توجه به ارزیابی های انجام شده، پارامترهای ورودی مربوط به چرخه پیل سوختی کربنات مذاب و چرخه میکروتوربین گازی جهت ارزیابی فنی در جدول (۵) نشان داده شده است:

جدول ۵- پارامترهای ورودی چرخه پیل سوختی

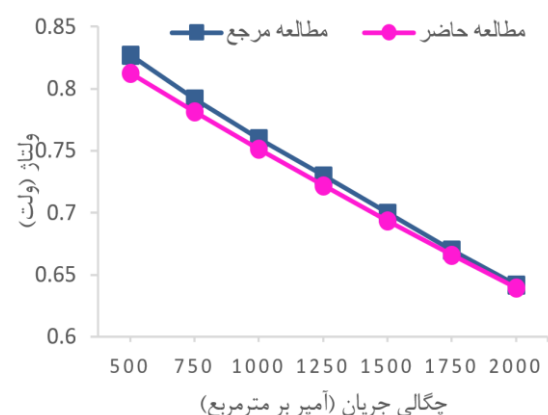
مرجع	مقدار	پارامترهای ورودی
پیل سوختی		
تحلیل حساسیت	۹۰٪	U_F
	۷۵٪	U_{CO_2}
	۸۰٪	U_{O_2}
	۲/۵	نسبت بخار آب به سوخت
	۶۳۰	دمای ورودی (°C)
	۱/۰۱۳	P_{MFCFC} (bar)
[۲۸]	۱۵۰۰	چگالی جریان (A/m^2)
[۲۸]	۱٪	درصد اتلاف حرارت
[۲۸]	۹۴٪	بازده مبدل DC-AC
میکرو توربین گازی		
تحلیل حساسیت	۵	نسبت فشار کمپرسور
	۱۱۰۰	دمای ورودی توربین (°C)
[۳۸]	۸۰٪	بازده بازیاب حرارتی
[۳۰]	۸۱٪	بازده آیزنتروپیک کمپرسور
[۳۰]	۸۴٪	بازده آیزنتروپیک میکروتوربین
[۳۰]	۲٪	اتلاف حرارت محفظه احتراق
[۴۱]	۵۰۰۰۹	LHV (kJ/kg) متان

همچنین پارامترهای ورودی برای ارزیابی اقتصادی در جدول (۶) آمده است:

جدول ۶- پارامترهای ورودی ارزیابی اقتصادی

مرجع	مقدار	فرضیات
[۴۰]	۲۵ سال	طول عمر سیستم (n)
[۴۰]	۸٪	نرخ تنزیل (i)
[۳۰]	۱,۰۶	ضریب تعمیرات (φ)
[۳۸]	۸۰۰۰ ساعت	

پژوهش مقایسه شد. نتایج ارزیابی در جدول زیر نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه نمودار قطبش مطالعه مرجع و مطالعه حاضر

با توجه به جدول (۴)، نتایج حاصل از مدل با خروجی مطالعه مرجع تطابق نسبتاً خوبی دارد و به میزان ۳٪ اختلاف بین توان های خالص خروجی و بازده ها وجود دارد. علت این اختلاف جزئی می تواند به دلیل ثابت بودن مقادیر ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (Cp) در مطالعه مرجع باشد، حال آنکه در مدل میکروتوربین توسعه داده شده در این پژوهش، مقادیر Cp به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج مدل توربین گاز و مطالعه مرجع

پارامتر	مدل حاضر	مطالعه مرجع	خطا
توان خروجی	۲۹,۱MW	۳۰MW	۳٪
بازده چرخه	۳۵,۷۴٪	۳۶,۸۶٪	۳٪

۶- نتایج

به منظور ارزیابی شرایط عملکرد پیل سوختی، تأثیر پارامترهایی نظیر ضریب به کارگیری اکسیدانت ها، فشار، نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی و ضریب به کارگیری هیدروژن بر روی بازده الکتریکی، مورد ارزیابی قرار گرفت. با تحلیل حساسیت صورت گرفته، افزایش پارامترهای نسبت بخار به سوخت، دمای ورودی و ضریب به کارگیری هیدروژن، منجر به افزایش بازده با شیب تند شده، از سوی دیگر، افزایش فشار، منجر به کاهش شدید بازده می شود. با ارزیابی تأثیر ضریب به کارگیری اکسیدانت ها، ضریب به کارگیری اکسیژن و دی اکسید کربن کمترین تأثیر را نسبت به سایر پارامترها روی بازده الکتریکی پیل سوختی دارند.

همچنین در چرخه میکروتوربین گازی با تحلیل

چرخه میکروتوربین	چرخه پیل سوختی	توان (kW)
۴,۲۷	۱,۰۰۸	۵۰۰
۸,۵۴	۲,۰۱	۱۰۰۰
۱۲,۸۱	۳,۰۲	۱۵۰۰
۱۷,۰۸	۴,۰۳	۲۰۰۰

هزینه زیست‌محیطی پایه (C _{CO₂})	۰,۰۲۲۴ \$/kg CO ₂	[۴]
هزینه سوخت (C _f)	۰,۰۰۴ \$/MJ	[۴]

به منظور ارزیابی چرخه‌ها، عملکرد هریک از چرخه‌ها برای تولید توان‌های خروجی ۵۰۰kW، ۱۰۰۰kW، ۱۵۰۰kW و ۲۰۰۰kW مورد بررسی قرار گرفته است.

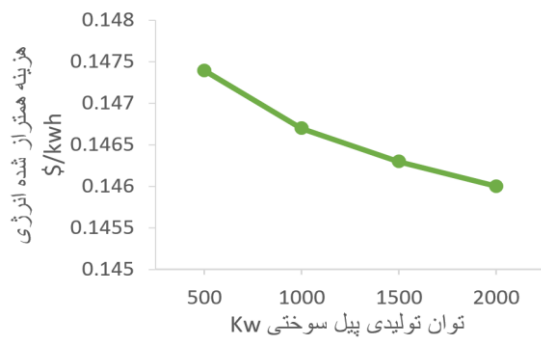
۶-۱- ارزیابی فنی

در شکل (۶) بازده‌های الکتریکی و حرارتی چرخه پیل سوختی و چرخه میکروتوربین با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به این شکل، بازده الکتریکی چرخه پیل سوختی ۵۴,۷۷٪ و چرخه میکرو توربین ۳۱,۶۹٪ به دست آمده که اختلاف فراوان ۲۳٪ بین بازده الکتریکی چرخه پیل سوختی و چرخه میکروتوربین را نشان می‌دهد.

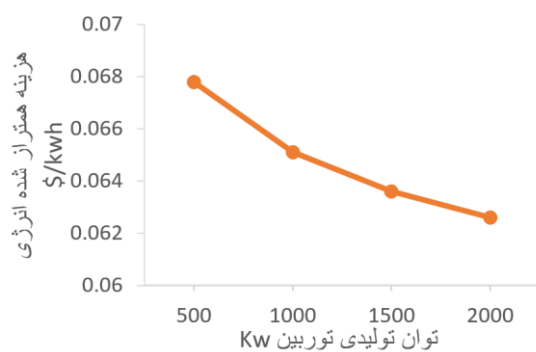
با توجه به اینکه بازده پیل سوختی از بازده محدودکننده کارنو تبعیت نمی‌کند و انرژی شیمیایی سوخت را بدون احتراق به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، بازده بالاتری نسبت به چرخه میکروتوربین گازی دارد. از سوی دیگر، پایین بودن بازده الکتریکی میکروتوربین، به معنای تلفات حرارتی بالا است. با بازیابی این جریان اتلافی برای تولید آب گرم مصرفی می‌توان به بازده حرارتی ۵۱,۱۷٪ رسید که این امر بازده کلی سیستم را افزایش می‌دهد. در چرخه پیل سوختی، حرارت اتلافی جریان‌ها به منظور تأمین گرمای مورد نیاز جریان‌ها و تولید بخار برای جریان بهسازی به کار گرفته می‌شود که این امر از یک سو نیاز به منبع خارجی برای تولید بخار را از بین می‌برد و از سوی دیگر منجر به کاهش تولید آب گرم مصرفی و در نتیجه بازده حرارتی ۲۰,۰۲٪ می‌شود. در جدول (۷) دبی آب گرم تولیدی در توان‌های مختلف در هریک از چرخه‌ها نشان داده شده است:

۶-۲- ارزیابی اقتصادی

در شکل‌های (۷) و (۸)، هزینه هم‌تراز شده تولید برق در توان‌های مختلف برای هریک از چرخه‌ها، بدون اعمال هزینه زیست‌محیطی نشان داده شده است. با در نظر گرفتن توان تولیدی ۲۰۰۰kW، هزینه هم‌تراز شده تولید توان در پیل سوختی و میکروتوربین به ترتیب ۱۴,۷cent/kWh و ۶,۸cent/kWh است.

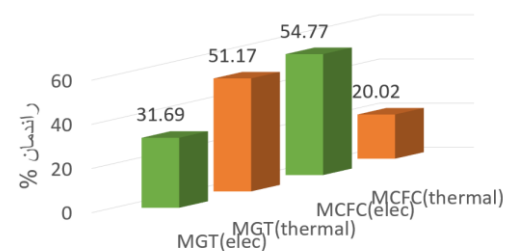


شکل ۷- هزینه هم‌تراز شده تولید برق در چرخه پیل سوختی



شکل ۸- هزینه هم‌تراز شده تولید برق در چرخه میکروتوربین

با توجه به نمودارهای نشان‌داده شده، هزینه هم‌تراز شده در پیل سوختی در این حالت، قابل رقابت با میکروتوربین نیست. دلیل اصلی این اختلاف قیمت، هزینه بالای فناوری پیل سوختی در حال حاضر است که با مطالعه بیشتر، تکامل و ترویج این فناوری در آینده، هزینه تولید برق این فناوری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، بالا بودن بازده تولید توان در پیل سوختی کربنات مذاب و عدم احتراق مستقیم به معنای



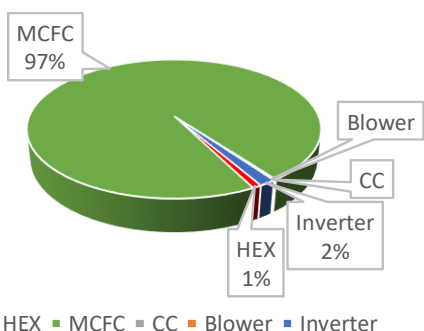
شکل ۶- مقایسه بازده چرخه پیل سوختی و میکروتوربین

جدول ۷- دبی آب گرم تولید شده (lit/s)

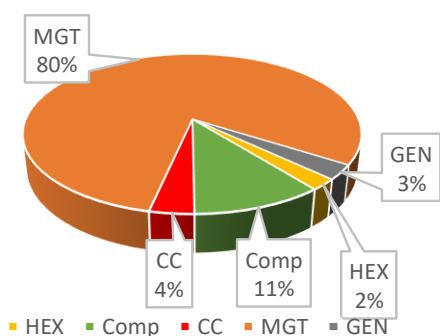
چرخه‌ها هستند.

۳-۶- ارزیابی زیست‌محیطی

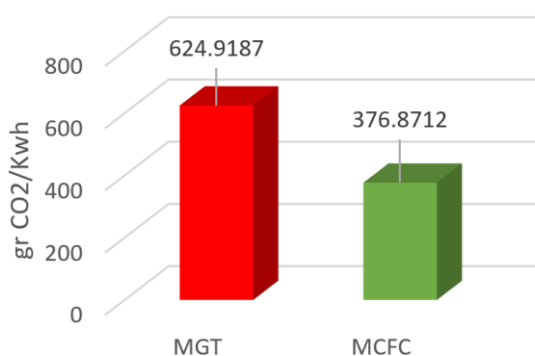
پیل‌های سوختی، فناوری‌های تبدیل انرژی با آلاینده‌گی زیست‌محیطی پایین هستند. در مقایسه با فناوری‌های رایج مانند توربین گازی، پیل‌های سوختی، فاقد انتشار آلاینده‌های خطرناکی نظیر NOX و SOX هستند. از نظر انتشار CO₂، در پیل سوختی به دلیل بازده بالا و عدم احتراق مستقیم سوخت، انتشار CO₂ کمتر است. در شکل (۱۲) مقدار انتشار CO₂ به‌ازای واحد انرژی تولیدی در هر چرخه نشان داده شده است.



شکل ۱۰- سهم هزینه هریک از اجزا در چرخه پیل سوختی

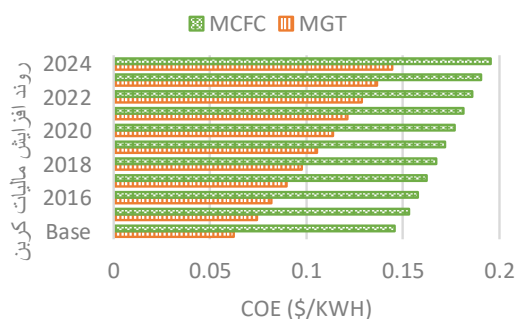


شکل ۱۱- سهم هزینه هریک از اجزا در چرخه میکرو توربین



شکل ۱۲- مقایسه میزان انتشار CO₂ به‌ازای واحد تولید انرژی

مصرف کمتر سوخت و آلاینده‌گی زیست‌محیطی کمتر است. در نتیجه، با در نظر گرفتن هزینه‌های خسارات زیست‌محیطی و مالیات کربن، این فناوری قابل‌رقابت‌تر با فناوری‌های رایج تولید توان مانند توربین گازی می‌شود. در شکل (۹) با استفاده از اطلاعات [۴۲]، تأثیر مالیات بر کربن و افزایش آن در سال‌های آینده بر هزینه هم‌تراز شده تولید برق در هر چرخه نشان داده شده است.



شکل ۹- تأثیر افزایش مالیات بر کربن در هزینه هم‌تراز شده تولید برق چرخه‌ها

با افزایش مالیات بر کربن تا سال ۲۰۲۴، فناوری پیل سوختی به مقدار زیادی قابل‌رقابت با فناوری رایج میکروتوربین می‌شود. نمودارهای شکل (۹) بدون در نظر گرفتن کاهش هزینه فناوری پیل سوختی کربنات مذاب در سال‌های آینده است، بنابراین با کاهش هزینه اولیه این فناوری و همچنین افزایش قیمت سوخت، استفاده از پیل سوختی کاملاً قابل‌رقابت با فناوری‌های رایج تولید توان می‌شود.

نکته دیگری که در نمودار شکل‌های (۷) و (۸) وجود دارد، تأثیر ابعاد در ارزیابی اقتصادی^۱ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش توان و به تبع آن ابعاد سیستم، هزینه به‌ازای واحد خروجی موردنظر که در اینجا هزینه به‌ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی است، کاهش پیدا می‌کند. این امر به دلیل توزیع خروجی سیستم در هزینه‌های ثابت است که با افزایش خروجی و ابعاد، منجر به کاهش هزینه هم‌تراز شده می‌شود.

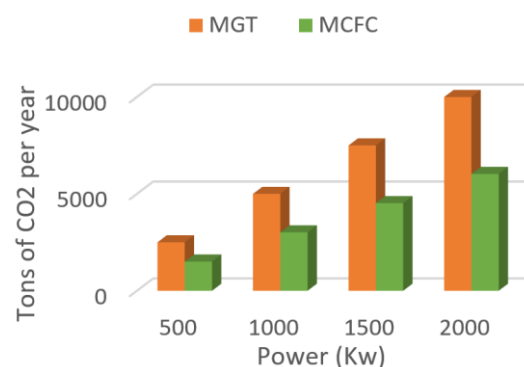
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، سهم تجهیزات هریک از چرخه‌های پیل سوختی و میکروتوربین برای توان تولیدی ۲۰۰ kW نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، بیشترین هزینه اولیه در چرخه‌ها مربوط به پیل سوختی و میکروتوربین است که تجهیزات اصلی تولید توان در

^۱ Economy of Scale

ارزیابی انجام شده، فناوری پیل سوختی کربنات مذاب از نظر آلاینده‌گی زیست‌محیطی، به مراتب پاک‌تر از فناوری میکروتوربین گازی است؛ زیرا آلاینده‌های خطرناکی نظیر SO_x و NO_x را منتشر نمی‌کند. همچنین مقدار انتشار گاز CO_2 تولیدی در پیل سوختی و میکروتوربین به ترتیب ۳۷۷ و ۶۲۵ گرم به‌ازای کیلووات ساعت به دست آمد که نشان‌دهنده ۴۰٪ انتشار کمتر در پیل سوختی است. در ارزیابی اقتصادی، فناوری پیل سوختی کربنات مذاب در حال حاضر قابل‌رقابت با فناوری‌های رایج تولید توان نیست. پارامترهای مختلفی نظیر مالیات بر کربن، قیمت سوخت و قیمت مجموعه پیل سوختی بسیار تأثیرگذارند. با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده، با افزایش مالیات بر کربن در سال‌های آتی و همچنین کاهش هزینه فناوری پیل سوختی، این فناوری قابل‌رقابت با فناوری‌های متداول تولید توان، نظیر میکروتوربین گازی می‌شود.

با توجه به شکل (۱۲)، انتشار CO_2 به‌ازای هر کیلووات ساعت توان تولیدی، در چرخه پیل سوختی کربنات مذاب ۴۰٪ کمتر از چرخه میکروتوربین گازی است. میزان انتشار CO_2 سالانه در توان‌های مختلف برای هر دو چرخه پیل سوختی و میکروتوربین در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۱۳)، انتشار CO_2 در توان‌های مختلف در پیل سوختی تقریباً به میزان نصف انتشار CO_2 در میکروتوربین گازی است. بنابراین افزایش مالیات بر کربن در سال‌های آتی، منجر به کاهش هزینه‌های فناوری پیل سوختی کربنات مذاب می‌شود و این فناوری را قابل‌رقابت با سایر فناوری‌های رایج تولید توان می‌گرداند.



شکل ۱۳- مقایسه انتشار CO_2 سالانه چرخه‌ها در توان‌های متفاوت

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد فناوری پیل سوختی کربنات مذاب با فناوری رایج تولید توان میکروتوربین گازی مقایسه شد. هدف از این مقایسه، ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی دو فناوری به‌منظور تولید هم‌زمان برق و حرارت است. برای این منظور در این پژوهش، مدل پیل سوختی کربنات مذاب با بهسازی داخلی غیرمستقیم مرحله‌به‌مرحله توسعه داده شد. پس از مدل‌سازی چرخه هر یک از دو فناوری، عملکرد هر چرخه برای تولید توان ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلووات ارزیابی شد. با توجه به ارزیابی فنی صورت‌گرفته، بازده الکتریکی چرخه پیل سوختی ۵۴٫۷۷٪ و چرخه میکروتوربین ۳۱٫۶۹٪ به دست آمد که اختلاف فراوان ۲۳٪ بین بازده الکتریکی چرخه پیل سوختی و چرخه میکروتوربین را نشان می‌دهد. این بازده بالای پیل سوختی از یک سو منجر به کاهش مصرف سوخت و از سوی دیگر، باعث کاهش آلاینده‌گی زیست‌محیطی می‌شود. با توجه به

فهرست علائم و اختصارات			
U_{O_2}	ضریب به‌کارگیری اکسیژن	$A(m^2)$	سطح فعال پیل سوختی
U_{CO_2}	ضریب به‌کارگیری اکسیدکربن	$C_p (kJ mol^{-1})$	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت
$V_{cell} (V)$	ولتاژ پیل سوختی	$c_f (\$/MJ)$	هزینه واحد سوخت
$(kW)\dot{W}$	توان	$c_{CO_2} (\$/kg)$	هزینه انتشار دی‌اکسیدکربن
$x (mol/s)$	دبی مولی تبدیل متان به هیدروژن	CRF	ضریب سرمایه‌گذاری
X_{eq}	نسبت مول تعادلی گازها	COE ($\$/kWh$)	هزینه هم‌تراز شده برق
$y (mol/s)$	دبی مولی تبدیل CO به هیدروژن	$E_{act} (J/mol)$	انرژی فعال‌سازی
$z (mol/s)$	دبی مولی مصرف هیدروژن	$E_{Nernst} (V)$	بیشینه ولتاژ قابل دستیابی
$Z_{env} (\$/year)$	هزینه زیست‌محیطی سالانه	F	ثابت فارادی
$Z_f (\$/year)$	هزینه عملیاتی سالانه	$h (kJ/mol)$	انتالپی
$Z_i (\$)$	هزینه سرمایه‌گذاری اجزای سیستم	I (A)	جریان پیل سوختی
$Z_k (\$/year)$	هزینه تبدیل شده سالانه تجهیزات	$i (A/m^2)$	چگالی جریان
$(J/mol \text{ } ^\circ K)\Delta G$	تابع انرژی آزاد گیبس	K	ثابت تعادل واکنش
η	بازده	LHV (kJ/kg)	ارزش حرارتی پایین سوخت
γ	نسبت ظرفیت گرمایی	$(kg/s)\dot{m}$	دبی جرمی
ε	بازده بازیاب حرارتی	n	طول عمر سیستم
φ	ضریب تعمیرات	N	تعداد ساعت عملکرد سیستم در سال
زیرنویس‌ها		$(mol/s)\dot{n}$	دبی مولی گازها
a	آند	$(mol/s)\dot{n}_x^0$	دبی مولی اولیه
AC	جریان متناوب	$P_i (bar)$	فشار جزئی گازها
c	کاند	$P_{MCFC} (bar)$	فشار کل پیل سوختی
DC	جریان مستقیم	$(kW)\dot{Q}$	گرمای تبادل مجموعه
in	ورودی	$R(kJ kmol^{-1}\text{ } ^\circ k^{-1})$	ثابت جهانی گازها
inv	مبدل جریان	R_x	مقاومت‌های پیل سوختی
FC	پیل سوختی	S/C	نسبت بخار به سوخت
net	خالص	T ($^\circ K$)	دما
ohm	اهمیک	$U (W/m^2 \text{ } ^\circ K)$	ضریب انتقال حرارت کلی
out	خروجی	U_F	ضریب به‌کارگیری هیدروژن

۶- مراجع

- [1] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, A. Alcayde and J. Gomez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, 2011, pp. 1753-1766.
- [۲] س. احمدی و م. ت. بطحایی، «مدل‌سازی و شبیه‌سازی راهبردهای بهینه مدیریت انرژی در خودروی هیبرید پیل سوختی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱-۱۶.
- [3] D. W. Hengeveld and S.T. Revankar, "Economic analysis of a combined heat and power molten carbonate fuel cell system", Journal of Power Sources, vol. 165, 2007, pp. 300-306.
- [4] A. Shirazi, M. Aminyavari, B. Najafi, F. Rinaldi and M. Razaghi, "Thermal-economic-environmental analysis and multi objective optimization of an internal-reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, 2012, pp. 19111-19124.
- [5] P. Heidebrecht and S. Sundmacher, "Molten carbonate fuel cell (MCFC) with internal reforming: model-based

- analysis of cell dynamics", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, 2003, pp. 1029-1036.
- [6] J. Brouwer, F. Jabbari, E. M. Leal and T. Orr, "Analysis of a molten carbonate fuel cell: Numerical Modeling and experimental validation", *Journal of Power Sources*, Vol. 158, 2006, pp. 213-224.
- [7] S. Campanari, G. Manzolini and P. Chiesa, "Using MCFC for high efficiency CO₂ capture from natural gas combined cycles: Comparison of internal and external reforming", *Applied Energy*, Vol. 112, 2013, pp. 772-783.
- [8] K. Kordesch and G. Simader, *Fuel cells and their applications*, VCH, New York, 1996.
- [9] M. Pfafferoth, P. Heidebrecht and K. Sundmacher, "Stack modelling of a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)", *Fuel Cells*, Vol. 10, No. 4, 2010, pp. 619-635.
- [10] J. Milewski, M. Wolowicz, A. Miller and R. Bernat, "A reduced order model of molten carbonate fuel cell: A proposal", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, 2013, pp. 11565-11575.
- [11] W. He and Q. Chen, "Three-dimensional simulation of a molten carbonate fuel cell stack using computational fluid dynamics technique", *Journal of Power Sources*, Vol. 55, No. 1, 1995, pp. 25-32.
- [12] F. Yoshida, N. Ono, Y. Izaki, T. Watanabe and T. Abe, "Numerical analyses of the internal conditions of a molten carbonate fuel cell stack: comparison of stack performances for various gas flow types", *Journal of Power Sources*, Vol. 71, No. 1, 1998, pp. 328-336.
- [13] P. Wang, L. Zhou, G. Li, H. Lin, Z. Shao, X. Zhang and B. Yi, "Direct internal reforming molten carbonate fuel cell with core-shell catalyst", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 2588-2595.
- [14] J. H. Koh, B. S. Kang and H. C. Lim, "Analysis of temperature and pressure fields in molten carbonate fuel cell stacks", *AIChE Journal*, Vol. 47, 2001, pp. 1941-1956.
- [15] J. H. Koh, B. S. Kang and H. C. Lim, "Effect of various stack parameters on temperature rise in molten carbonate fuel cell", *Journal of Power Sources*, vol. 91, No. 2, 2000, pp. 161-171.
- [16] A. Liu and Y. Weng, "Modeling of molten carbonate fuel cell based on the volume-resistance characteristics and experimental analysis", *Journal of Power Sources*, Vol. 195, 2010, pp. 1872-1879.
- [17] M. Pfafferoth, P. Heidebrecht and K. Sundmacher, "Stack modelling of molten carbonate fuel cell", *Fuel Cells*, Vol. 10, 2010, pp. 619-635.
- [18] M. D. Lukas, K. Y. Lee and H. Ghezal Ayagh, "Development of a stack simulation model for control study on direct reforming Molten Carbonate Fuel Cell Power Plant", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, 1999, pp. 1651-1657.
- [19] A. Haghghat Mamaghani, B. Najafi, A. Shirazi and F. Rinaldi, "Exergetic, economic and environmental evaluations and multi-objective optimization of a combined molten carbonate fuel cell-gas turbine system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 77, 2015, pp. 1-11.
- [20] P. Lora and S. Campanari, "Development of a three dimensional molten carbonate fuel cell model and application to hybrid cycle simulation", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, 2007, pp. 501-510.
- [21] L. Leto, C. Dispenza, A. Moreno and A. Calabro, "Simulation model of a molten carbonate fuel cell-micro turbine hybrid system", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 1263-1271.
- [22] J. Ohtuski, A. Kusunoki, T. Murahashi, T. Tanaka and E. Nishiyama, in *Proc Int. Fuel Cell Conf*, Makuhan, Japan, Feb 3-6, 1992, pp 251-254.
- [23] T. Okada, H. Ide, M. Miyazaki and T. Tanaka, in *Proc 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf*, Reno, NV, USA, Aug 12-17, 1990, Vol 3 pp. 207-212.
- [24] K. Jarosch, T. El Solh and H. de Lasa, "Modelling the catalytic steam reforming of methane: discrimination between kinetic expressions using sequentially designed experiments", *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, 2002, pp. 3439-3451.
- [25] A. Appleby, L. Blomen and M. Mugerwa, in *Fuel Cell Systems*, New York, Plenum Press, 1993.
- [26] M. Fermeglia, A. Cudicio, G. DeSimon, G. Longo and S. Priol, "Process Simulation for Molten Carbonate Fuel Cells", *Fuel Cells*, Vol. 5, No. 1, 2005.
- [27] L. Duan, B. He and Y. Yang, "Parameter optimization study on SOFC-MGT hybrid power system", *International Journal of Energy Research*, Vol. 35, 2011, pp. 721-732.
- [28] S. Campanari, P. Chiesa and G. Manzolini, "CO₂ capture from combined cycle integrated with Molten Carbonate Fuel Cells", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 4, 2010, pp. 441-451.
- [29] H. Hao, H. Zhang, S. Weng and M. Su, "Dynamic numerical simulation of a molten carbonate fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 161, 2006, pp. 849-855.
- [30] Y. Haseli, I. Dincer and G. Naterer, "Thermodynamic modeling of a gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, 2008, pp. 5811-5822.

- [۳۱] ج. پیرکندی، م. جهرمی و م. محمودی، «شبیه سازی پارامتری یک سیستم تولید هم زمان بر پایه میکروتوربین صنعتی از دیدگاه انرژی و اقتصادی»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۰، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۱۷-۳۲.
- [32] H. Huang, J. Li, Z. He, T. Zeng, N. Kobayashi and M. Kubota, "Performance analysis of a MCFC/MGT Hybrid Power system Bi-Fueled by city gas and biogas", *Energies*, Vol. 8, 2015, pp. 5661-5667.
- [33] S. Sanaye and A. Ketabi, "4E analysis and multi objective optimization of a micro gas turbine and solid oxide fuel cell hybrid combined heat and power system", *Journal of Power Sources*, Vol. 247, 2014, pp. 294-306.
- [34] K. Sugiura and I. Naruse, "Feasibility study of the co-generation system with direct internal reforming molten carbonate fuel cell for residential use", *Journal of Power Sources*, Vol. 106, 2002, pp. 51-59.
- [۳۵] ع. زینلی، ح. اقبالی و و. رفیعی، «مدل سازی بازیاب های حرارتی دوار»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۸، بهار ۱۳۹۱، صفحه ۹-۱۸.
- [36] S. A. Song, J. Han, S. P. Yoon, S. W. Nam, I.-H. Oh and D. K. Choi, "Economic feasibility study for Molten Carbonate Fuel Cells fed with biogas", *Journal of Electrochemical Science and Technology*, Vol. 1, 2010, pp. 102-111.
- [37] A. Bejan, G. Tsatsaronis and M. Moran, *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
- [38] A. Valero, M.A. Lozano, L. Serra, G. Tsatsaronis, J. Pisa, C. Frangopoulos and M.R. Von Spakovsky, "CGAM Problem: Definition and conventional solution", *Energy*, Vol. 19, 1994, pp. 279-286.
- [39] A. shirazi, M. Aminyavari, B. Najafi, F. Rinaldi and M. Razaghi, "Thermal-economic-environmental analysis and multi-objective optimization of an internal-reforming solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 19111-19124.
- [40] S. Campanari, P. Chiesa, G. Manzolini and S. Bedogni, "Economic analysis of CO2 Capture from natural gas combined cycles using Molten Carbonate Fuel Cells", *Applied Energy*, 2014.
- [41] A. Haghghat Mamaghani, B. Najafi, A. Shirazi and F. Rinaldi, "4E analysis and multi objective optimization of an integrated MCFC and ORC system", *Energy*, 2015, pp. 1-14, 2015.
- [42] <https://www.c2es.org/>, [Online].