



تحلیل اگزروزواکونومیک سیستم تولید سه‌گانه بر مبنای پیل سوختی اکسید جامد با ریفرمر خارجی و دی‌متیل‌اتر

سهیلا صالح میرحسینی*، صمد جعفرمدار، شهرام خلیل‌آریا، عطا چیت‌ساز

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶

کلمات کلیدی:

پیل سوختی اکسید جامد
دی‌متیل‌اتر
سیستم تولید سه‌گانه
ریفرمر خارجی
تحلیل اگزروزواکونومیک

خلاصه: در مطالعه حاضر، یک سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی بر اساس پیل سوختی اکسید جامد با ریفرمر خارجی، سیستم تبرید گس و بازیاب حرارتی از دیدگاه ترمودینامیکی و اگزروزواکونومیکی مورد بررسی قرار گرفته است. از یک ریفرمر خارجی برای تبدیل سوخت دی‌متیل‌اتر به هیدروژن، جهت مصرف در واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل سوختی استفاده شده است. تأثیر پارامترهای اساسی (ضریب بهره‌وری سوخت و دمای جریان ورودی به آند) بر روی چندین متغیر (بازده انرژی و اگزروزی، تخریب اگزروزی و هزینه واحد توان تولیدی) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، بازده انرژی سیستم پیشنهادی از بازده پیل سوختی به تنهایی بیش از ۳۸٪ بیشتر است. بالا بردن دمای جریان ورودی به آند موجب نزولی شدن روند تخریب اگزروزی در پس‌سوز و پیل سوختی می‌شود در حالی که بر روی بازیاب حرارتی تأثیری معکوس دارد. هزینه واحد تولیدی تحت شرایط معین برابر با ۲۳/۵۱ \$/GJ است و با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت و یا افزایش دمای جریان ورودی به آند روند نزولی دارد. افزایش ضریب بهره‌وری سوخت موجب افزایش بازده‌های قانون دوم به میزان ۱۲٪ می‌شود. تأثیر افزایش دمای جریان ورودی به آند بر بازده‌های قانون دوم نیز مثبت است ولی نسبت به افزایش ضریب بهره‌وری سوخت پایین‌تر بوده و بازده‌ها ۸٪ افزایش می‌یابند.

۱- مقدمه

در یک نیروگاه تولید سه‌گانه^۱، حرارت اتلافی^۲ از واحد تولید توان الکتریکی از قبیل یک توربین گاز یا یک پیل سوختی، برای راندن سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی استفاده می‌شود. تولید سه‌گانه به معنی تولید همزمان سرمایش، گرمایش و توان الکتریکی بر مبنای یک نوع منبع انرژی است. بنابراین استفاده از نیروگاه‌های تولید سه‌گانه باعث افزایش بازده حرارتی کل و کاهش آلودگی محیط خواهد بود. در نیروگاه تولید سه‌گانه، میزان بهبود بازده نیروگاه تابع عملکرد هر یک از واحدها و روش ادغام واحدهای نیروگاه است. پیل سوختی که یکی از مولدهای اصلی قابل استفاده در سیستم‌های تولید سه‌گانه است، یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. پیل سوختی اکسید جامد بازدهی در حدود ۴۵ تا ۶۰ داشته و طول عمر این نوع پیل سوختی بیش از ۴۰۰۰۰ ساعت است. ترکیب این نوع پیل سوختی با یک توربین، بازده انرژی کلی را به ۷۰٪ افزایش

موجودی و دسترسی به منابع و گرمایش جهانی، دو مورد مهم برای پایداری تولید انرژی در آینده است. تقاضا برای انرژی، روز به روز افزایش می‌یابد در حالی که منابع سوخت‌های تجدیدناپذیر (سوخت‌های فسیلی) در حال کاهش‌اند. انتظار می‌رود مصرف انرژی جهان، ما بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۳۰ حدود ۴۰٪ افزایش یابد [۱]. از این رو، امروزه پیدا کردن سیستم‌های انرژی با بازده بالا نسبت به هر زمان دیگری از شروع انقلاب صنعتی، بسیار مهم و تعیین‌کننده است. بازده نیروگاه‌های برق متداول که بر مبنای یک محرک اصلی هستند معمولاً کمتر از ۳۹٪ بوده و بیشتر انرژی به صورت حرارت اتلافی از بین می‌رود. ادغام سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در یک نیروگاه معمولی، بازده نیروگاه را به طور عمده‌ای افزایش می‌دهد، به طوری که می‌توان به این ترتیب بازده نیروگاه تولید همزمان و گرمایش^۱ را به ۸۰٪ رساند [۲ و ۳].

2 Combined Cooling, Heating and Power (CCHP)
3 Waste heat

1 Combine Heating and Power (CHP)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: soheila.mirhasani@gmail.com



می‌دهد. با توجه به دمای بالای کارکرد پیل سختی اکسید جامد، این نوع پیل سوختی در نیروگاه‌های بزرگ تولید برق و همچنین نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴ و ۵].

بورر و همکارانش [۶] یک سیستم تولید سه‌گانه را که محرک اصلی آن ترکیب توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد بود، تحلیل کردند. تحلیل آنها نشان داد که سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد و توربین گاز از نظر اقتصادی و محیطی زمانی که قیمت گاز طبیعی و الکتریسیته بالا می‌باشد، مفید و مناسب است. وبر و همکارانش [۷] از پیل سوختی اکسید جامد به عنوان محرک اصلی نیروگاه تولید سه‌گانه استفاده کردند. آنها تحلیل‌های هزینه و انتشار آلاینده‌ها را در یک سیستم تولید سه‌گانه در یک ساختمان اداری انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این مدل در مقایسه با نیروگاه معمولی انتشار آلاینده‌ها ۳۰٪ کاهش می‌یابد و هزینه‌ها تقریباً ۷۰٪ افزایش می‌یابد. کوالسکی و زنوزی [۸] یک نیروگاه تولید سه‌گانه بر مبنای محرک اصلی پیل‌های سوختی را با سه نیروگاه دیگر بر مبنای توربین گاز مقایسه کردند. تحلیل آنها نشان می‌داد، سیستم‌های بر مبنای پیل سوختی نسبت به سیستم‌های بر مبنای توربین گاز در کاربردهای بار تبریدی بالاتر، عملکرد بهتری دارند. تحقیق انجام شده توسط وانگ و همکارانش [۹] نیز نتیجه بدست آمده از تحلیل کوالسکی و زنوزی [۸] را تأیید کرد.

بعدها چیت‌ساز و همکاران [۱۰] در مطالعه‌ای تحلیل انرژی و زیست محیطی را بر روی یک سیستم تولید سه‌گانه با محرک پیل سوختی اکسید جامد انجام دادند. رنجبر و همکاران [۱۱] نیز یک سیستم تولید سه‌گانه با محرک پیل سوختی را معرفی و تحلیل انرژی و انرژی را بر روی انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم تولید سه‌گانه بازده انرژی را حداقل ۳۳٪ افزایش می‌دهد. همین‌طور با افزایش چگالی جریان، بازده انرژی کاهش یافته و مقدار بهینه‌ای برای چگالی جریان وجود دارد که در آن توان الکتریکی بیشینه خواهد بود. شاولین ما و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به منظور بازیافت گرمای اتلافی از سیستم پیل سوختی اکسید جامد و کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها، یک سیستم نیروگاه تولید سه‌گانه با محرک پیل سوختی اکسید جامد پیشنهاد کردند تا از سیستم تولید سه‌گانه‌ای با استفاده از مخلوط آب-آمونیاک بهره بگیرند. سیستم پیشنهادی آنها که سوخت اصلی آن متان است می‌تواند بطور همزمان

الکتریسیته، بار گرمایی و بار سرمایی تولید کند. نتایج این تحقیق نشان داد که تحت این شرایط با وجود کاهش بازده پیل سوختی اکسید جامد و کاهش بازده الکتریکی، بازده تبدیل انرژی کلی بیش از ۸۰٪ می‌شود. در تحقیقی که اخیراً توسط اسحاق و دینسر [۱۳] ارائه شده است، ترکیب یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک، کوپل شده با توربین گازی، مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق، با نام تحلیل انرژی و انرژی یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت مستقیم آمونیاک، کوپل شده با یک توربین گازی انجام گرفته است.

در سال‌های اخیر اکثر تحقیقات و پژوهش‌ها در زمینه پیل سوختی، با در نظر گرفتن گاز متان، سین‌گاز و گازهای فاضلابی به عنوان سوخت مصرفی در پیل سوختی انجام شده است. در بین حامل‌های انرژی دارای هیدروژن، سوخت‌های الکلی نظیر دی‌متیل‌اتر سوخت‌هایی با مزایای رقابتی ویژه محسوب می‌شوند. این سوخت‌ها مانند هیدروژن، مفیدتر از منابع انرژی اولیه بوده و می‌تواند از بازه گسترده‌ای از سوخت‌های اولیه (گاز طبیعی، زغال سنگ، بیومس) و از طریق گازی‌سازی یا فرآیندهای سنتز شیمیایی حاصل شوند. علاوه بر این، دی‌متیل‌اتر عاری از سولفور، فلزات سنگین و دیگر ناخالصی‌ها بوده و با بازده تبدیل بالا و تولید آلاینده پایین می‌تواند برای تولید انرژی در پیل‌های سوختی، توربین‌های گازی و موتورهای احتراق داخلی به کار گرفته شود.

لئون و همکاران [۱۴] عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت‌های مایع را با ریفرمینگ داخلی مورد تحقیق قرار دادند. این سوخت‌ها متان، متانول و اتانول بودند. کوکو و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای بر روی پارامترهای اساسی در سیستم‌های هیبرید پیل سوختی اکسید جامد با میکروتوربین گازی انجام داده‌اند. در این مطالعه از سوخت متانول و دی‌متیل‌اتر به جای متان استفاده شده است. در تحقیق دیگری چائو و همکارانش [۱۶] استفاده از یک پیل سوختی اکسید جامد با سوخت دی‌متیل‌اتر را برای فرآیند کُک‌سازی مد نظر قرار داده و تأثیر دمای کاری در ریفرمینگ دی‌متیل‌اتر و روند تولید دی‌اکسید کربن حین این فرآیند را به توجه به توان دریافتی از پیل سوختی در فرآیند کُک‌سازی، مورد بررسی قرار داده‌اند. کاتسوتوشی ساتو و همکارانش [۱۷] نیز به مطالعه و بررسی یک پیل سوختی اکسید جامد دوگانه‌سوز با سوخت‌های دی‌متیل‌اتر و گاز نفتی

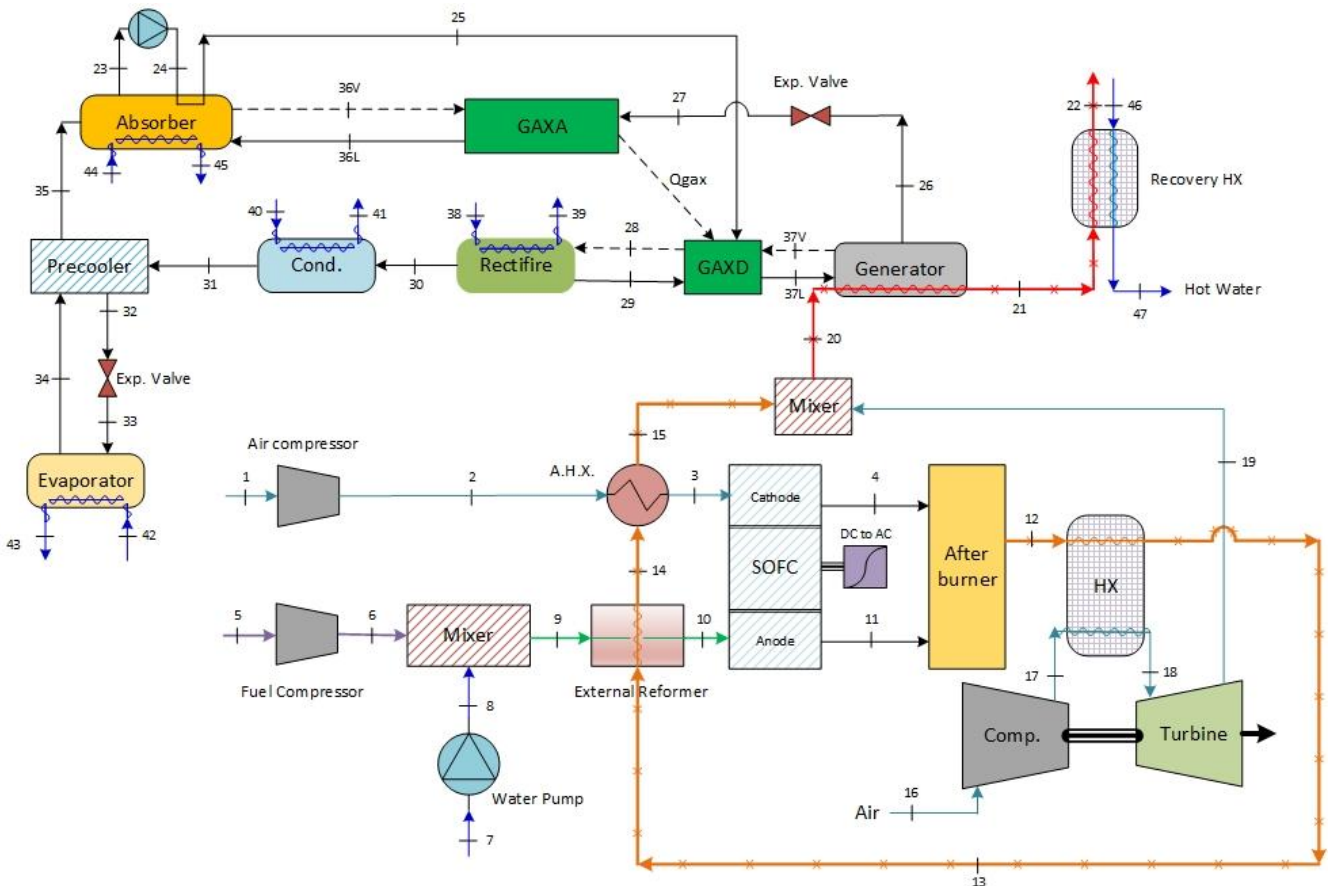
این رو در این تحقیق سعی شده است تا با معرفی یک سیستم تولید سه‌گانه با سوخت دی‌متیل‌اتر، به تحلیل ترمودینامیکی آن پرداخته شود.

۲- توصیف سیستم پیشنهادی

طرح شماتیکی از سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. سیستم از یک پیل سوختی اکسید جامد^۲، یک سیکل برایتون برای تولید توان و یک سیستم گس^۳ برای تولید سرمایه‌ی و یک مبدل حرارتی برای گرمایش تشکیل شده است. دی‌متیل‌اتر، آب و هوا به مقدار جزئی متراکم می‌شوند تا فشار آنها به فشار کاری پیل سوختی برسد. برای تولید هیدروژن از سوخت، نیاز به فرایند ریفرمینگ خواهد بود که استفاده از بخار آب برای این عمل^۴ بهترین گزینه خواهد بود. در محفظه اختلاط آب و دی‌متیل‌اتر با یکدیگر مخلوط شده و سپس وارد ریفرمر خارجی می‌شوند. خروجی

مایع^۱ پرداخته‌اند. نتیجه تحقیق آنها نشان داد که در صورت استفاده از دی‌متیل‌اتر به جای گاز نفتی مایع در پیل سوختی اکسید جامد، کارایی پیل سوختی تغییری نداشته و در نتیجه می‌توان بدون انجام هیچ تغییری در پیل سوختی اکسید جامد با سوخت اصلی گاز نفتی مایع، از دی‌متیل‌اتر به عنوان سوخت کمکی با کارایی مناسب استفاده کرد. در ادامه تحقیقات انجام گرفته در خصوص پیل‌های سوختی اکسید جامد با سوخت دی‌متیل‌اتر، اسنیتینیگف و همکارانش [۱۸] انواع کاتالیست‌ها را به منظور تولید هیدروژن برای استفاده در مصارف پیل سوختی توسط ریفرمینگ متانول، بایو اتانول و دی‌متیل‌اتر با بخار، مورد بررسی قرار داده‌اند.

علی‌رغم تحقیقات انجام گرفته پیشین، اخیراً مطالعه جدیدی مبنی بر استفاده از سوخت الکلی دی‌متیل‌اتر در یک پیل سوختی اکسید جامد انجام نگرفته و همچنین تحقیقی در رابطه با استفاده از این سوخت در یک سیستم تولید سه‌گانه، منتشر نشده است. از



شکل ۱ طرح‌واره سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی
Fig. 1. A schematic diagram of the proposed trigeneration system

- 2 SOFC
- 3 GAX
- 4 Reforming

- 1 Liquefied Petroleum Gas (LPG)

در روابط (۴) تا (۹) آورده شده‌اند، تعیین می‌شوند.

$$m_r \rightarrow [CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2] \quad (14)$$

$$p_r \rightarrow [H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O] \quad (15)$$

ضریب مصرف سوخت و هوا به ترتیب به صورت نشان داده شده

در روابط (۱۶) و (۱۷)، تعریف می‌شوند:

$$U_f = \frac{p_r}{\dot{n}_{H_2}[10] + m_r} \quad (16)$$

$$U_o = \frac{p_r/2}{\dot{n}_{O_2}[3]} \quad (17)$$

با به کار بردن قانون بقای جرم، نرخ‌های جریان مولی گازهای در

حال جریان تعیین می‌شود:

$$\dot{n}_{H_2O}[11] = \dot{n}_{H_2O}[10] + p_r - m_r \quad (18)$$

$$\dot{n}_{CO}[11] = \dot{n}_{CO}[10] - m_r \quad (19)$$

$$\dot{n}_{CO_2}[11] = \dot{n}_{CO_2}[10] + m_r \quad (20)$$

$$\dot{n}_{H_2}[11] = \dot{n}_{H_2}[10] + m_r - p_r \quad (21)$$

$$\dot{n}_{O_2}[4] = \dot{n}_{O_2}[3] - p_r/2 \quad (22)$$

$$\dot{n}_{N_2}[3] = \frac{79}{21} \dot{n}_{O_2}[3] \quad (23)$$

$$\dot{n}_{N_2}[4] = \dot{n}_{N_2}[3] \quad (24)$$

به دلیل تعادل ترمودینامیکی واکنش‌ها و با استفاده از ثابت تعادل

واکنش، کسر مولی و نرخ جریان مولی گازهای حاصل از روابط (۲۵)

تا (۲۸) تعیین می‌شوند:

$$\ln(K_s) = -\Delta\bar{g}_s^0 / \bar{R} \times T[11] \quad (25)$$

$$K_s = \frac{y_{CO_2}[11] \times y_{H_2}[11]}{y_{CO}[11] \times y_{H_2O}[11]} \quad (26)$$

$$\Delta\bar{g}_s^0 = \bar{g}_{s,CO_2}^0 + \bar{g}_{s,H_2}^0 - \bar{g}_{s,H_2O}^0 - \bar{g}_{s,CO}^0 \quad (27)$$

$$\bar{g}_s^0 = \bar{h} - T[11]\bar{s}^0 \quad (28)$$

$$\dot{n}_{CH_3OCH_3}[9] = x_r \quad (4)$$

$$\dot{n}_{H_2O}[9] = SCR \times \dot{n}_{CH_3OCH_3}[9] \quad (5)$$

$$\dot{n}_{CO}[10] = y_r - z_r \quad (6)$$

$$\dot{n}_{CO_2}[10] = z_r \quad (7)$$

$$\dot{n}_{H_2}[10] = 2y_r + z_r \quad (8)$$

$$\dot{n}_{H_2O}[10] = \dot{n}_{H_2O}[9] - x_r - z_r \quad (9)$$

برای توصیف کمترین نسبت مولی بخار به سوخت، نسبت بخار به

کربن (SCR) تعریف شده است. تحقیقات نشان می‌دهد نسبت بخار

به کربن بسیار کوچک منجر به رسوب کردن حین فرآیند ریفرمینگ

خواهد شد [۲۱-۲۴]. از سوی دیگر، نسبت‌های بالاتر نسبت بخار به

کربن موجب کاهش غلظت یون هیدروژن به دلیل رقیق بودن ناشی

از آب واکنش نداده خواهد بود. کمترین نسبت مولی بخار به سوخت

برای بیشینه کردن تولید هیدروژن ۱/۵ است. به دلیل عمل ریفرمینگ

دی‌متیل‌اتر در دمای پایین، در دما بالای گازهای خروجی از پی سوز

دی‌متیل‌اتر به صورت کامل ریفرم شده و در گازهای خروجی ریفرمر

وجود نخواهد داشت. به دلیل تعادل ترمودینامیکی واکنش‌ها و با

استفاده از ثابت تعادل واکنش دوم، کسر مولی و نرخ جریان مولی

گازهای حاصل از ریفرم تعیین می‌شوند:

$$\ln(K_s) = -\Delta\bar{g}_s^0 / \bar{R} \times T[10] \quad (10)$$

$$K_s = \frac{y_{CO_2}[10] \times y_{H_2}[10]}{y_{CO}[10] \times y_{H_2O}[10]} \quad (11)$$

$$\Delta\bar{g}_s^0 = \bar{g}_{s,CO_2}^0 + \bar{g}_{s,H_2}^0 - \bar{g}_{s,H_2O}^0 - \bar{g}_{s,CO}^0 \quad (12)$$

$$\bar{g}_s^0 = \bar{h} - T[10]\bar{s}^0 \quad (13)$$

۳-۳- مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد

روابط (۱۴) و (۱۵)، واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی رُخ

دهنده در آند و کاتد پیل سوختی را نشان می‌دهند.

جدول ۲: معادلات الکتروشیمیایی برای پیل سوختی اکسید جامد [۲۵]
Table 2. Electrochemical equations for solid oxide fuel cell [25]

معادله	پارامتر
	ولتاژ نرنست:
$V_N = -\frac{\Delta \bar{g}^0}{2F} - \frac{\bar{R}T_c}{2F} \ln \left[\frac{y_{H_2O}}{y_{H_2} \sqrt{y_{O_2}}} \right] - \frac{\bar{R}T_c}{4F} \ln P_c$	(۳۳)
	ولتاژ اهمی:
$V_{ohm} = (R_{contact} + \rho_a L_a + \rho_c L_c + \rho_e L_e + \rho_{int} L_{int}) \times j$	(۳۴)
$\rho_a = \left(95 \times \frac{10^6}{T_{FC,e}} \exp\left(-\frac{1150}{T_{FC,e}}\right) \right)^{-1}$	(۳۵)
$\rho_c = \left(42 \times \frac{10^6}{T_{FC,e}} \exp\left(-\frac{1200}{T_{FC,e}}\right) \right)^{-1}$	(۳۶)
$\rho_e = \left(3.34 \times \frac{10^4}{T_{FC,e}} \exp\left(-\frac{10300}{T_{FC,e}}\right) \right)^{-1}$	(۳۷)
$\rho_{int} = \left(9.3 \times \frac{10^6}{T_{FC,e}} \exp\left(-\frac{1100}{T_{FC,e}}\right) \right)^{-1}$	(۳۸)
	ولتاژ غلظتی:
$V_{conc} = V_{conc,a} + V_{conc,c}$	(۳۹)
$V_{conc,a} = \frac{\bar{R}T_{FC,e}}{2F} \left(-\ln \left(1 - \frac{j}{j_{as}} \right) + \ln \left(1 - \frac{p_{H_2} \cdot j}{p_{H_2O} \cdot j_{as}} \right) \right)$	(۴۰)
$V_{conc,c} = -\frac{\bar{R}T_{FC,e}}{2F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_{cs}} \right)$	(۴۱)
$j_{as} = \frac{2 \cdot F \cdot p_{H_2} \cdot D_{a,eff}}{\bar{R}T_{FC,e} \cdot L_a}$	(۴۲)
$j_{cs} = \frac{2 \cdot F \cdot p_{O_2} \cdot D_{c,eff}}{\left(\frac{p_{O_2} - p_{O_2}}{p_{O_2}} \right) \bar{R}T_{FC,e} \cdot L_c}$	(۴۳)
	ولتاژ فعالسازی:
$V_{act} = V_{act,a} + V_{act,c}$	(۴۴)
$V_{act,a} = \frac{\bar{R}T_{FC,e}}{F} \left(\text{Sinh}^{-1} \left(\frac{j}{1.3 \times 10^4} \right) \right)$	(۴۵)
$V_{act,c} = \frac{\bar{R}T_{FC,e}}{F} \left(\text{Sinh}^{-1} \left(\frac{j}{0.5 \times 10^4} \right) \right)$	(۴۶)

صرف نظر کردن از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی، بالانس انرژی به صورت نشان داده شده در رابطه (۴۷)، نوشته می‌شود:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_i \dot{n}_i \bar{h}_i - \sum_e \dot{n}_e \bar{h}_e \quad (۴۷)$$

نرخ تخریب انرژی در هر جزء نیز از رابطه (۴۸) به دست می‌آید:

$$\dot{i} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{cv} + \sum_i \dot{E}x_i - \sum_e \dot{E}x_e \quad (۴۸)$$

که $T[۱۱]$ دمای خروجی از پیل سوختی است. شدت جریان الکتریکی و چگالی جریان نیز مطابق با روابط (۲۹) و (۳۰)، محاسبه می‌شوند:

$$I = j \cdot A_a \quad (۲۹)$$

$$j = \frac{2Fp_r}{N_{FC}A_a} \quad (۳۰)$$

توان تولیدی توسط پیل سوختی و ولتاژ کاری آن به صورت نشان داده شده در روابط (۳۱) و (۳۲)، تعریف می‌شوند:

$$\dot{W}_{FC,stack} = N_{FC} \cdot I \cdot V_c \quad (۳۱)$$

$$V_c = V_N - V_{loss} \quad (۳۲)$$

که V_N ولتاژ نرنست و V_{loss} مجموع افت ولتاژها می‌باشد. ولتاژ نرنست بیشترین ولتاژی است که در صورت وجود نداشتن جریان در مدار می‌توان به آن دست یافت. افت ولتاژ کل مجموع سه افت ولتاژ جداگانه است: افت ولتاژ اهمی، افت ولتاژ غلظتی و افت ولتاژ فعالسازی. روابط مربوط به محاسبه ولتاژ نرنست و افت ولتاژها در جدول ۲ آورده شده است.

۳-۴- اعتبارسنجی

برای ارزیابی میزان صحت مدل پیل سوختی در این پژوهش، از داده‌های تجربی تائو و همکاران [۲۵] استفاده شده است. در پیل سوختی مربوط به پژوهش تائو و همکاران [۲۵]، سوخت متان بوده است. از این‌رو برای اعتبارسنجی برنامه برای متان نوشته شده و پس از بررسی صحیح بودن، برنامه برای سوخت دی‌متیل‌تر تغییر داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، نتایج مدل پیشنهادی با داده‌های تائو و همکاران [۲۵] توافق خوبی دارد. سیکل گکس نیز قبلاً در مرجع [۲۶] اعتبارسنجی شده است. از آنجایی که بخش‌های مختلف این مدل به طور جداگانه مورد اعتبارسنجی قرار گرفته‌اند، می‌توان نتیجه گرفت مدل حاضر صحیح می‌باشد.

۳-۵- تحلیل ترمودینامیکی

با در نظر گرفتن هر یک از اجزا به عنوان یک حجم کنترل و با

جدول ۳: مقایسه نتایج بدست آمده از مدل با مقادیر تجربی ارائه شده توسط تائو و همکاران [۲۵]

Table 3. Comparison of the results obtained from the model with the experimental values provided by Tao et al [25]

Error (%)	Power Density (W/m ²) [مدل]	Power Density (W/m ²) [۲۵]	Error (%)	V _{SOFC} (V) [مدل]	V _{SOFC} (V) [۲۵]	j (A/m ²)
+۴	۰/۱۵۶	۰/۱۵	+۱	۰/۷۶۷۷	۰/۷۶	۲۰۰۰
+۲/۸۵	۰/۲۱۶	۰/۲۱	+۴/۷	۰/۷۱۲	۰/۶۸	۳۰۰۰
-۰/۷۶۹	۰/۲۵۸	۰/۲۶	+۴/۱۹	۰/۶۴۶	۰/۶۲	۴۰۰۰
+۱/۶	۰/۳	۰/۲۹۵	-۰/۹	۰/۵۶۴۸	۰/۵۷	۵۰۰۰
+۱/۵	۰/۳۲	۰/۳۱۵	+۲	۰/۵۳۰۴	۰/۵۲	۶۰۰۰

صورت نشان داده شده در رابطه (۶۱)، قابل محاسبه است:

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{g,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (۶۱)$$

$$\dot{C} = c\dot{E} \quad (۶۲)$$

که C هزینه واحد انرژی برای هر جریان است. \dot{Z}_k میزان هزینه کل مرتبط با سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری برای جزء K بر حسب دلار بر ساعت می‌باشد و از روابط (۶۳) تا (۶۶)، قابل محاسبه است [۲۷]:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (۶۳)$$

در رابطه (۴۸)، نشانگر نرخ انتقال انرژی ناشی از انتقال حرارت در مرز با دمای T_{∞} است. در جدول ۴ روابط بکار رفته برای تعیین بازده انرژی آورده شده‌اند.

برای مقایسه دو سیستم انرژی مختلف، تحلیل‌های انرژی و انرژی کافی نیستند. بلکه ترکیبی از این دو تحلیل که انرژی‌اقتصادی خوانده می‌شود برای سنجش ناکارآمدی‌ها و دلایل آن در سیستم انرژی بکار می‌رود. محاسبه هزینه محصولات تولید شده توسط سیستم و نیز بهینه‌سازی سیستم هدف تحلیل انرژی‌اقتصادی است. معادله توازن هزینه برای هر جزء از سیستم که گرما گرفته و کار انجام می‌دهد به

جدول ۴ روابط به کار رفته برای تعیین بازده انرژی و انرژی

Table 4. Equations used to determine energy and exergy efficiencies

معادله	پارامتر
$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{CH_3OH} \cdot LHV$ $LHV = 20094 \text{ kJ/kg}$	نرخ انرژی ورودی به سیستم: (۴۹)
$\dot{W}_{FC,stack,ac} = \eta_{inv} \dot{W}_{FC,stack}$	توان استک پیل سوختی: (۵۰)
$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{FC,stack,ac} + \dot{W}_T - (\dot{W}_{wp} + \dot{W}_{ac,1} + \dot{W}_{ac,2} + \dot{W}_{fc} + \dot{W}_{mainpump} + \dot{W}_{sfump})$	(۵۱)
$\eta_{FC} = (\dot{W}_{FC,stack,ac} - \dot{W}_{wp} - \dot{W}_{ac,1} - \dot{W}_{fc}) / \dot{Q}_{in}$	(۵۲)
$\eta_{el} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in}$	(۵۳)
$\eta_{cog,h} = (\dot{W}_{net} + \dot{Q}_h) / \dot{Q}_{in}$	(۵۴)
$\dot{Q}_h = \dot{m}_w (h_{71} - h_{70})$	
$\eta_{cog,c} = (\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{eva}) / \dot{Q}_{in}$	(۵۵)
$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_{eva} (h_{49} - h_{50})$	
$\eta_{tri} = (\dot{W}_{net} + \dot{Q}_h + \dot{Q}_{eva}) / \dot{Q}_{in}$	(۵۶)
$\dot{E}_{in} = \dot{m}_{CH_3OH} \cdot \bar{e}_{CH_3OH}^{ch,0}$	(۵۷)
$\psi_e = \dot{W}_{net} / \dot{E}_{in}$	
$\psi_{cog,c} = (\dot{W}_{net} + \dot{E}_{43}) / \dot{E}_{in}$	(۵۸)
$\psi_{cog,h} = (\dot{W}_{net} + \dot{E}_{47}) / \dot{E}_{in}$	(۵۹)
$\psi_{tri} = (\dot{W}_{net} + \dot{E}_{43} + \dot{E}_{47}) / \dot{E}_{in}$	(۶۰)

روابط مورد استفاده برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات و بالانس هزینه، در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند.

$$\dot{Z}_k^{CI} = \left(\frac{CRF}{\tau} \right) Z_k \quad (64)$$

$$CRF = \frac{i_r(1-i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1} \quad (65)$$

۴- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل‌های ارائه شده در این تحقیق نیز به صورت خواص ترمودینامیکی نقاط اصلی سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی در جدول ۷ آورده شده‌اند.

در شکل ۲، چگونگی تغییرات بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه و بازده‌های قانون دوم با تغییرات ضریب بهره‌گیری سوخت نشان داده شده است. با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت از ۰/۷ به ۰/۹، بازده‌های قانون دوم افزایش یافته و بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه به مقدار یک درصد کاهش می‌یابد. با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت، به دلیل افزایش غلظت سوخت، میزان افت ولتاژ غلظتی افزایش می‌یابد در حالی که سایر افت ولتاژها ثابت هستند. به این

$$\dot{Z}_k^{OM} = \gamma_k Z_k + \omega_k \dot{E}_{p,k} + \dot{R}_k \quad (66)$$

ضریب بازگشت سرمایه محسوب می‌گردد که به نرخ بهره و طول عمر تجهیزات وابسته است. i_r نرخ بهره و n تعداد سال‌های کارکرد اجزای سیستم می‌باشد. γ_k برابر با ۰/۱ فرض شده و از دو عبارت دیگر در سمت راست رابطه (۶۶) صرف نظر شده است. با استفاده از ضریب هزینه نیروگاه مهندسی شیمی، هزینه هر جزء سیستم از سال اصلی به سال مرجع تغییر یافته است:

$$\dot{Z}_{k,PY} = \dot{Z}_k \times \frac{CI_k}{CI_0} \quad (67)$$

جدول ۵ هزینه سرمایه‌گذاری برای هر یک از اجزای سیستم
Table 5. The capital investment for each component of the system

مرجع	CEPCI [۱۹]	سال مرجع	معادله هزینه	تجهیز
[۲۰]	۴۰۲/۳	۲۰۰۳	$Z_{AC} = 91562 \times (\dot{W}_{AC} / 455)^{0.67}$ (۶۸)	کمپرسور هوای ۱ و ۲
[۲۸]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{fc} = 91562 \times (\dot{W}_{fc} / 455)^{0.67}$ (۶۹)	کمپرسور سوخت
[۲۸]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{pump} = 3 \times 422 \times (\dot{W}_{p1} / 1)^{0.71} \times 1.41 \times f_n$ $f_n = 1 + (0.2 / (1 - \eta_{p1}))$ (۷۰)	پمپ آب
[۲۹]	۴۶۸/۲	۲۰۰۵	$Z_{HX1} = 130 \times (A_{HX1} / 0.093)^{0.78}$ (۷۱)	مبدل حرارتی هوا
[۳۰]	۳۹۵/۶	۲۰۰۲	$Z_{FC} = A_a \times N_{FC} \times (2.96 \times T_{FC,e} - 1907)$ (۷۲)	پیل سوختی
[۳۱]			$Z_{reformer} = 0.1 \times Z_{FC}$ (۷۳)	ریفرمر خارجی
[۲۰]	۳۹۵/۶	۲۰۰۲	$Z_{inv} = 100000 \times (\dot{W}_{FC,DC} / 500)^{0.7}$ (۷۴)	مبدل جریان مستقیم به متناوب
[۳۰]	۳۶۸/۱	۱۹۹۴	$Z_{AB} = \left(46.08 \times \frac{\dot{m}_4}{0.955 - (P_2 / P_4)} \right) \times (1 + e^{0.018T_{i3} - 26.4})$ (۷۵)	پس‌سوز
[۲۹]	۴۶۸/۲	۲۰۰۵	$Z_{HX2} = 130 \times (A_{HX2} / 0.093)^{0.78}$ (۷۶)	مبدل حرارتی ۲
[۲۹]	۴۶۸/۲	۲۰۰۵	$Z_T = \dot{W}_T \times (1318.5 - 98.32 \times \ln(\dot{W}_T))$ (۷۷)	توربین
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{desorber} = 17500 \times (A_{desorber} / 100)^{0.6}$ (۷۸)	دزوربر
[۳۲]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{GAXD} = 17500 \times (A_{GAXD} / 100)^{0.6}$ (۷۹)	دزوربر گکس
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{absorber} = 17500 \times (A_{absorber} / 100)^{0.6}$ (۸۰)	ابزوربر
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{GAXA} = 16500 \times (A_{GAXA} / 100)^{0.6}$ (۸۱)	ابزوربر گکس
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{rectifier} = 17000 \times (A_{rectifier} / 100)^{0.6}$ (۸۲)	رکتی فایر
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{cond} = 8000 \times (A_{cond} / 100)^{0.6}$ (۸۳)	کندانسور
[۳۲]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{PC} = 12000 \times (A_{PC} / 100)^{0.6}$ (۸۴)	پیش سردکن
[۲۹]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{eva} = 16000 \times (A_{eva} / 100)^{0.6}$ (۸۵)	اواپراتور
[۲۸]	۳۹۴/۱	۲۰۰۰	$Z_{mainpump} = 2100 \times (\dot{W}_p / 10)^{0.26} \times \left(\frac{1 - \text{etap}}{\text{etap}} \right)^{0.5}$ (۸۶)	پمپ اصلی
[۲۹]	۴۶۸/۲	۲۰۰۵	$Z_{HX3} = 130 \times (A_{HX3} / 0.093)^{0.78}$ (۸۷)	مبدل حرارتی ۳

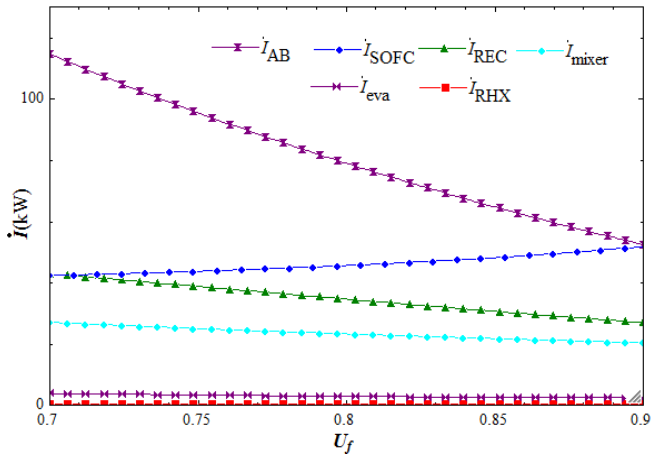
جدول ۶. روابط بالانس هزینه، معادلات کمکی برای هر یک از اجزا
Table 6. Cost balance equations, auxiliary equations for each component

معادله کمکی	رابطه بالانس هزینه	تجهیز
$c_1 = 0$	$\dot{C}_2 = \dot{C}_1 + \dot{Z}_{AC, PY}$	کمپرسور هوا
$c_5 = 9.5[\$/GJ]$	$\dot{C}_6 = \dot{C}_5 + \dot{Z}_{fc, PY}$	کمپرسور سوخت
$c_7 = 0$	$\dot{C}_8 = \dot{C}_7 + \dot{Z}_{wp, PY}$	پمپ آب
$c_{15} = c_{14}$	$\dot{C}_{15} + \dot{C}_3 = \dot{C}_{14} + \dot{C}_2 + \dot{Z}_{AHE, PY}$	مبدل حرارتی هوا
$\dot{Z}_{ref, PY} = 0.1 \times \dot{Z}_{FC, PY}$	$\dot{C}_9 = \dot{C}_6 + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{mixer, PY}$	محفظه اختلاط ۱
$c_{13} = c_{14}$	$\dot{C}_{10} + \dot{C}_{14} = \dot{C}_9 + \dot{C}_{13} + \dot{Z}_{ref, PY}$	ریفرمر خارجی
$c_{11} = c_{48}$	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{11} + \dot{C}_{48} = \dot{C}_3 + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{FC, PY}$	پیل سوختی
$c_4 = c_{48}$	$\dot{C}_{49} = \dot{C}_{48} + \dot{Z}_{INV}$	مبدل جریان مستقیم به متناوب
$c_{49} = c_w$	$\dot{C}_{12} = \dot{C}_4 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{AB, PY}$	پس‌سوز
$c_{16} = 0$	$\dot{C}_{17} = \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{AC, PY}$	کمپرسور هوای ۲
$c_{12} = c_{13}$	$\dot{C}_{13} + \dot{C}_{18} = \dot{C}_{12} + \dot{C}_{17} + \dot{Z}_{HX2, PY}$	مبدل حرارتی ۲
$c_{49} = c_w$	$\dot{C}_{19} + \dot{C}_{49} = \dot{C}_{18} + \dot{Z}_{T, PY}$	توربین
$(\dot{C}_{28} - \dot{C}_{25}) / (\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{25}) = (\dot{C}_{26} - \dot{C}_{25}) / (\dot{E}x_{26} - \dot{E}x_{25})$	$\dot{C}_{20} = \dot{C}_{19} + \dot{C}_{15a} + \dot{Z}_{mixer, PY}$	محفظه اختلاط ۲
$c_{20} = c_{21}$	$\dot{C}_{26} + \dot{C}_{28} + \dot{C}_{21} = \dot{C}_{29} + \dot{C}_{20} + \dot{C}_{25} + \dot{C}_{GAXD} + \dot{Z}_{desorber, PY}$	دزوربر
$c_{rq} = c_{av}$	$(\dot{C}_{27} + \dot{C}_{35}) / (\dot{E}x_{27} + \dot{E}x_{35}) = \frac{\dot{C}_{23}}{\dot{E}x_{23}}$	دزوربر گکس
$c_{25} = c_{av}$	$\dot{C}_{28} + \dot{C}_{37, l} = \dot{C}_{v, 37} + \dot{C}_{25} + \dot{C}_{rq} + \dot{C}_{29} + \dot{Z}_{GAXD, PY}$	
$c_{44} = 0$	$(\dot{C}_{27} + \dot{C}_{24}) / (\dot{E}x_{27} + \dot{E}x_{24}) = \frac{\dot{C}_{25}}{\dot{E}x_{25}}$	
	$\dot{C}_{23} + \dot{C}_{25} + \dot{C}_{45} + \dot{C}_{GAXA} = \dot{C}_{35} + \dot{C}_{27} + \dot{C}_{24} + \dot{Z}_{absorber, PY}$	ابزوربر
	$(\dot{C}_{av} - (\dot{C}_{27} + \dot{C}_{v, 36})) / (\dot{E}x_{av} - (\dot{E}x_{34} - \dot{E}x_{v, 36})) = (\dot{C}_{l, 36} - (\dot{C}_{28} - \dot{C}_{v, 27})) / (\dot{E}x_{l, 36} - (\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{v, 27}))$	
	$\dot{C}_{av} + \dot{C}_{36, l} = \dot{C}_{v, 36} + \dot{C}_{27} + \dot{Z}_{GAXA, PY}$	
	$(\dot{C}_{30} - \dot{C}_{28}) / (\dot{E}x_{30} - \dot{E}x_{28}) = (\dot{C}_{28} - \dot{C}_{27}) / (\dot{E}x_{28} - \dot{E}x_{27})$	ابزوربر گکس
$c_{38} = c_{39}$	$\dot{C}_{30} + \dot{C}_{29} + \dot{C}_{39} = \dot{C}_{28} + \dot{C}_{38} + \dot{Z}_{rectifier, PY}$	رکتی‌فایر
$c_{40} = c_{41}$	$\dot{C}_{41} + \dot{C}_{31} = \dot{C}_{29} + \dot{C}_{38} + \dot{Z}_{cond, PY}$	کندانسور
$c_{34} = c_{35}$	$\dot{C}_{35} + \dot{C}_{32} = \dot{C}_{31} + \dot{C}_{34} + \dot{Z}_{PC, PY}$	پیش‌سردکن
$c_{33} = c_{34}$	$\dot{C}_{43} + \dot{C}_{34} = \dot{C}_{42} + \dot{C}_{33} + \dot{Z}_{eva, PY}$	اواپراتور
	$\dot{C}_{26} = \dot{C}_{27} + \dot{Z}_{expvalve1, PY}$	شیر انبساط ۱
$c_p = c_w$	$\dot{C}_{33} = \dot{C}_{32} + \dot{Z}_{expvalve2, PY}$	شیر انبساط ۲
$c_{21} = c_{22}$	$\dot{C}_{24} = \dot{C}_{23} + \dot{C}_p + \dot{Z}_{mainpump, PY} + \dot{Z}_{motor, PY}$	پمپ اصلی و موتور
	$\dot{C}_{47} + \dot{C}_{27} = \dot{C}_{46} + \dot{C}_{21} + \dot{Z}_{HX3, PY}$	بازیاب حرارتی
$c_w = \frac{\dot{C}_{w, net}}{\dot{W}_{net}}$		
$c_{cooling} = \frac{\dot{C}_{43}}{\dot{E}x_{43}}$		
$c_{heating} = \frac{\dot{C}_{47}}{\dot{E}x_{47}}$		

جدول ۷. خواص ترمودینامیکی و هزینه جریان‌های سیستم

Table 7. Thermodynamic properties and cost of the streams of the system

c (\$/GJ)	C (\$/h)	\dot{E} (kW)	\dot{m} (kg/s)	p (kPa)	T (K)	جریان
.	.	۶/۱۳۸	۱/۳۷۱	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۱
۲۶/۳۲	۲/۶۸۲	۲۸/۴۱	۱/۳۷۱	۱۲۱/۶	۳۱۶/۹	۲
۲۹/۸	۲۹/۸۲	۲۷۸	۱/۳۷۱	۱۱۹/۱	۴۷۵/۹	۳
۲۰/۳۸	۲۹/۳۳	۳۹۹/۸	۱/۳۶۶	۱۱۶/۷	۸۷۷	۴
۰۹/۵	۲۲/۸۹	۶۶۹/۴	-/۱۸۴	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۵
۹/۵۱۳	۲۲/۹۳	۶۶۹/۴	-/۱۸۴	۱۲۱/۶	۳۰۶/۴	۶
.	.	۱۱/۳۸	-/۲۱۶	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۷
-/۰۱۸	-/۰۰۰۷۶	۱۱/۳۹	-/۲۱۶	۱۲۱/۶	۲۹۸/۲	۸
۹/۶۶۲	۲۲/۹۳	۶۵۹/۲	-/۰۴	۱۲۱/۶	۳۰۰/۱	۹
۱۲/۳۳	۲۷/۲۲	۶۱۳/۳	-/۰۴	۱۱۹/۱	۷۷۷	۱۰
۲۰/۳۸	۱۱/۹۵	۱۶۲/۹	-/۰۷۲	۱۱۶/۷	۸۷۷	۱۱
۲۳/۳	۴۱/۷۸	۴۹۸	۱/۴۳۸	۱۱۰/۹	۹۳۷/۴	۱۲
۲۳/۳	۳۶/۶۲	۴۳۶/۵	۱/۴۳۸	۱۰۸/۷	۸۸۵/۱	۱۳
۲۳/۳	۲۹/۹۶	۳۵۷/۱	۱/۴۳۸	۱۰۴/۴	۸۱۵/۸	۱۴
۲۳/۳	۴/۲۸۲	۵۱/۰۵	۱/۴۳۸	۱۰۲/۳	۴۴۰/۳	۱۵
.	.	۱/۰۳۳	-/۲۳	۱۰/۱۳	۲۹۸/۱۵	۱۶
۲۶/۹۳	۶/۳۳۷	۶۵/۳۵	-/۲۳	۱۰/۱۳	۵۶۹/۱	۱۷
۲۷/۳۷	۱۱/۵۵	۱۱۷/۳	-/۲۳	۹۹۲/۷	۹۱۹	۱۸
۲۷/۳۷	۱/۸۳۲	۱۸/۶	-/۲۳	۹۹/۲۷	۵۶۲/۸	۱۹
۲۷/۴۶	۵/۰۴۴	۵۱/۰۱	۱/۳۰۹	۹۹/۲۷	۴۶۱/۷	۲۰
۲۷/۴۶	۳/۶۸۸	۳۷/۳	۱/۳۰۹	۹۹/۲۷	۴۳۱/۷	۲۱
۲۷/۴۶	-/۴۴۶	۴/۵۱۸	۱/۳۰۹	۹۷/۲۹	۳۲۰/۹	۲۲
۵۹/۶۹	۲۰/۲/۸	۹۴۳/۸	-/۱	۴۷۸/۴	۳۱۵	۲۳
۵۹/۶۹	۲۰/۲/۹	۹۴۴	-/۱	۱۵۴۸	۳۱۵/۵	۲۴
۵۹/۶	۲۰/۳	۹۴۶/۲	-/۱	۱۵۴۸	۳۵۸/۹	۲۵
۵۸/۸۱	۳۳/۲۶	۱۵۷/۱	-/۱	۱۵۴۸	۴۳۹/۴	۲۶
۵۹	۳۳/۲۶	۱۵۶/۶	-/۰۶	۴۷۸/۴	۲۹۹/۲	۲۷
۵۹/۵۷	۱۷۵/۲	۸۱۷/۱	-/۰۴۱	۱۵۴۸	۳۵۸/۹	۲۸
۶۴/۲۲	۲/۲۰۷	۹/۵۴۷	-/۰۰۱	۱۵۴۸	۳۵۸/۹	۲۹
۵۹/۵۷	۱۷۳	۸۰۶/۹	-/۰۴۰۲	۱۵۴۸	۳۴۰/۳	۳۰
۵۹/۷۹	۱۷۳/۱	۸۰۴/۲	-/۰۴۰۲	۱۵۴۸	۳۱۳/۲	۳۱
۵۹/۸۲	۱۷۳/۲	۸۰۴/۱	-/۰۴۰۲	۱۵۴۸	۲۸۵/۳	۳۲
۵۹/۸۲	۱۷۳/۲	۸۰۴	-/۰۴۰۲	۴۷۸/۴	۲۷۶/۲	۳۳
۵۹/۸۲	۱۷۲/۴	۸۰۰/۷	-/۰۴۰۲	۴۷۸/۴	۲۷۸/۲	۳۴
۵۹/۸۲	۱۷۲/۴	۸۰۰/۵	-/۰۴۰۲	۴۷۸/۴	۳۰۳/۳	۳۵
۷۹/۰۸	۵۸/۲۹	۲۰۴/۸	-/۰۱۱	۴۷۸/۴	۳۵۸/۹	۳۶V
۷۰/۳۷	۸۹/۶۹	۳۵۴	-/۰۷	۴۷۸/۴	۳۵۸/۹	۳۶L
۵۹/۲۹	۶۰/۹۹	۲۸۵/۷	-/۰۱۶	۱۵۴۸	۲۹۹/۲	۳۷V
۵۹/۶	۹۳/۱۴	۴۳۴/۲	-/۰۷	۱۵۴۸	۲۹۹/۲	۳۷L
.	.	-/۰۰۰۰۴	-/۰۲۵	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۳۸
.	.	-/۲۶۶	-/۰۲۵	۱۰/۱۳	۳۳۸/۹	۳۹
.	.	-/۰۰۰۶۷	-/۵۱۶	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۴۰
.	.	۱/۶۸۸	-/۵۱۶	۱۰/۱۳	۳۲۰/۳	۴۱
.	.	-/۰۰۰۸	-/۶۵	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۴۲
۱۶۵/۷	-/۸۱۱	۱/۳۶	-/۶۵	۱۰/۱۳	۲۸۱/۲	۴۳
.	.	-/۰۰۰۰۲	-/۲۰۸	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۴۴
۱۰/۱/۴	-/۸۱۲	۲/۲۲۷	-/۲۰۸	۱۰/۱۳	۳۳۸/۹	۴۵
.	.	۷۹۱	۱/۵	۱۰/۱۳	۲۹۸/۲	۴۶
۱/۵۲۸	۴/۳۸۳	۷۹۶/۹	۱/۵	۹۹/۲۷	۳۲۲/۴	۴۷

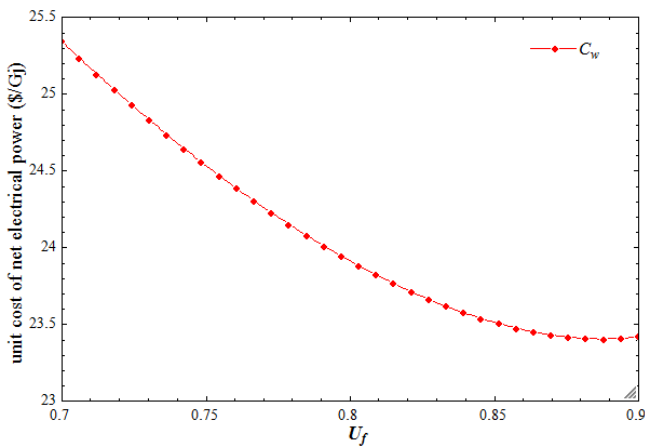


شکل ۳ چگونگی تغییرات میزان تخریب انرژی اجزای مختلف با تغییرات ضریب بهره‌گیری سوخت

Fig. 3. The influence of fuel utilization factor variation on exergy destruction in different components

سوختی است. با کاهش دماها در نقاط مختلف سیکل، میزان اختلاف دما در جریان‌های گرم‌شونده و سردشونده کاهش یافته که موجب نزولی شدن روند تخریب انرژی در مبدل‌های حرارتی می‌شود.

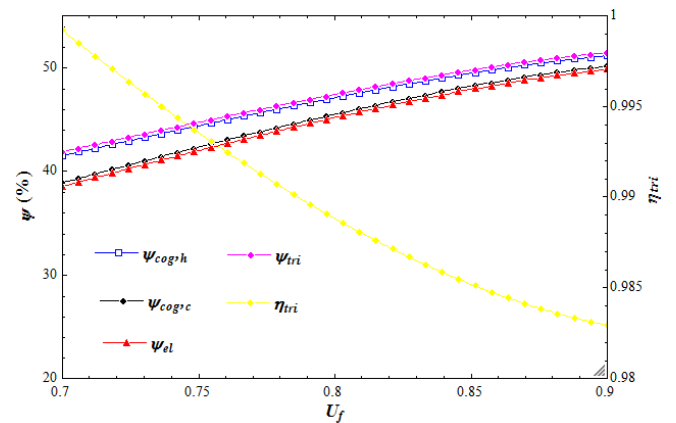
در شکل ۴ تغییرات هزینه واحد توان تولیدی بر حسب تغییرات ضریب بهره‌وری سوخت نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت، هزینه واحد توان تولیدی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت برای تولید توان میزان کمتری از سوخت و هوا مورد نیاز خواهد بود که کاهش هزینه مربوط به سوخت مصرفی و نیز هزینه‌های تجهیزات (پمپ‌ها و کمپرسورهای کوچکتر، مبدل‌های حرارتی با مساحت کمتر) را به دنبال دارد.



شکل ۴: چگونگی تغییرات هزینه واحد توان تولیدی سیستم با تغییرات ضریب بهره‌گیری سوخت.

Fig. 4. The influence of fuel utilization factor variation on unit cost of power

ترتیب با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت، ولتاژ پیل سوختی کاهش می‌یابد. افزایش ضریب بهره‌وری سوخت به معنای کاهش دبی سوخت و هوای مصرفی است که کاهش کار مورد نیاز کمپرسورها و پمپ‌ها را به دنبال دارد. اگرچه با کاهش سوخت و هوای مصرفی دماهای نقاط مختلف در سیکل نیز کاهش می‌یابند و در نتیجه توان خالص سیستم و توان سرمایشی و گرمایشی نیز کاهش خواهد داشت اما اثر کاهش دبی سوخت ورودی غالب است و باعث افزایش بازده‌های قانون دوم می‌شود. تمامی بازده‌های قانون دوم افزایشی معادل ۱۲٪ دارند. در مورد بازده قانون اول سیستم آثار این کاهش‌ها تقریباً معادل است و فقط کاهش نزدیک یک درصد قابل مشاهده است.

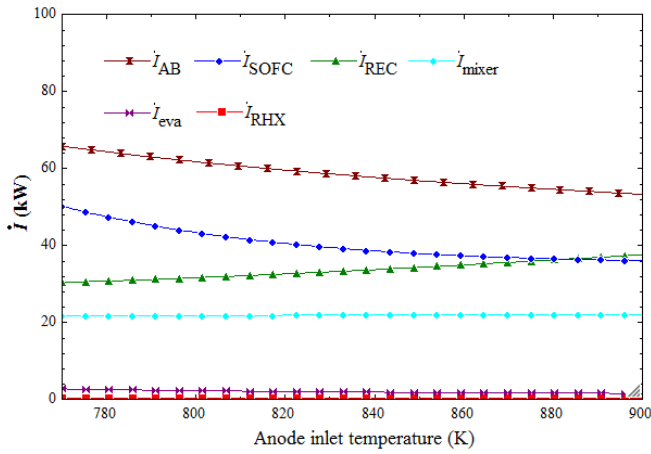


شکل ۲ چگونگی تغییرات بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه و بازده‌های قانون دوم با تغییرات ضریب بهره‌گیری سوخت

Fig. 2. The influence of fuel utilization factor variation on first and second law efficiencies of the trigeneration system

در شکل ۳، چگونگی تغییرات میزان تخریب انرژی اجزای مختلف با تغییرات ضریب بهره‌گیری سوخت دیده می‌شود. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، بالاترین میزان تخریب انرژی به ترتیب متعلق به پس‌سوز، پیل سوختی و بازیاب گرما است. سه عامل تخریب انرژی واکنش شیمیایی، اختلاط و انتقال گرمای همراه با اختلاف دما در جریان‌ها است. دلیل تخریب انرژی در محفظه احتراق و پیل سوختی واکنش شیمیایی، و در بازیاب گرما انتقال حرارت با اختلاف دما در جریان‌ها است. به جز پیل سوختی، در سایر اجزا با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت میزان تخریب انرژی روند نزولی دارد و با افزایش ضریب بهره‌وری سوخت کاهش می‌یابد. در پیل سوختی، با افزایش غلظت سوخت افت فشار غلظتی و در نتیجه تخریب انرژی افزایش می‌یابد و این دلیل روند صعودی نمودار تخریب انرژی پیل

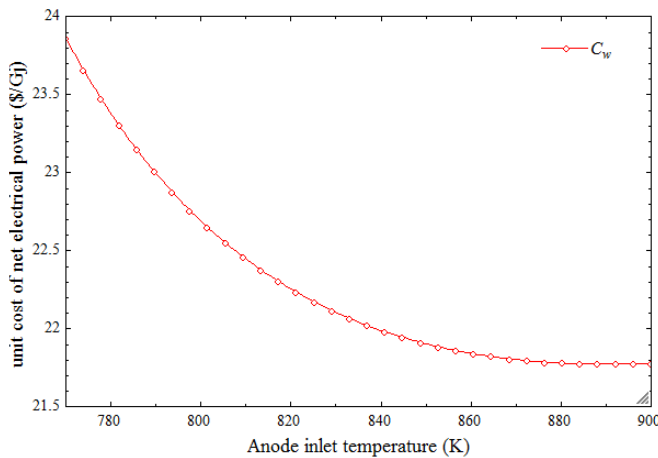
باز یاب حرارتی بالا می‌رود و به دلیل اختلاف دمای بالای آن با جریان گرم شونده ورودی به باز یاب، تخریب اگزرژی بالا خواهد رفت.



شکل ۶: چگونگی تغییر میزان تخریب اگزرژی اجزای مختلف با تغییرات دمای جریان ورودی به آند

Fig. 6. The influence of anode inlet temperature variation on exergy destruction in different components

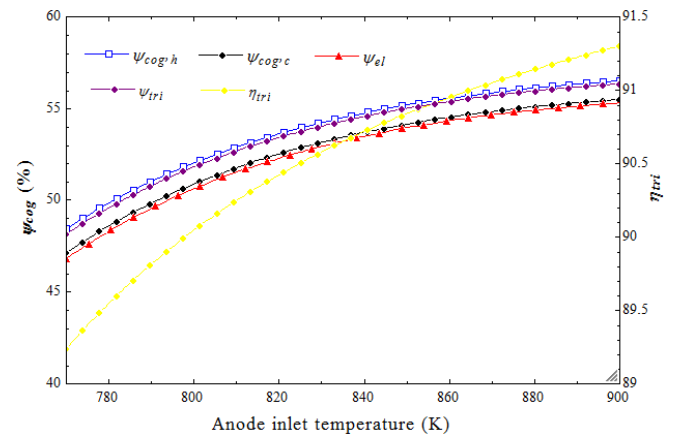
در شکل ۷ می‌توان تغییرات هزینه واحد توان تولیدی را با تغییرات دمای جریان ورودی به آند، مشاهده کرد. به دلیل کاهش مصرف سوخت و در نتیجه هزینه اگزرژی ورودی و از سوی دیگر افزایش توان تولیدی، روند این نمودار نزولی خواهد بود. با بالا رفتن دمای جریان ورودی به آند، واکنش‌های شیمیایی در پیل سوختی و محفظه احتراق در دمای بالاتر و با سرعت بیشتری رخ می‌دهند. بالا رفتن دمای محصولات احتراق خروجی از محفظه احتراق، باعث بالا رفتن دمای جریان ورودی به توربین شده و کار توربین را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر میزان سوخت ورودی افزایش ناچیزی دارد



شکل ۷: چگونگی تغییرات هزینه واحد توان تولیدی سیستم با تغییرات دمای جریان ورودی به آند

Fig. 7. The influence of anode inlet temperature variation on unit cost of power

در شکل‌های ۵ تا ۷ اثر تغییرات دمای جریان ورودی به آند بر روی بازده‌ها، میزان تخریب اگزرژی در اجزاء و هزینه واحد توان تولیدی نشان داده شده است. در شکل ۵، چگونگی تغییرات بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه و بازده‌های قانون دوم با تغییرات دمای جریان ورودی به آند در چگالی جریان ثابت برابر با A/m^2 و 3500 و ضریب بهره‌وری سوخت 0.85 نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تمامی بازده‌ها با افزایش دما روند صعودی دارند. با وجود کاهش بار سرمایشی اواپراتور به دلیل کاهش دبی ناشی از کاهش دبی سوخت و هوا، آثار افزایش توان تولیدی خالص و افزایش توان حرارتی در باز یاب، موجب روند صعودی بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه می‌شود.



شکل ۵: چگونگی تغییرات بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه و بازده‌های قانون دوم با تغییرات دمای جریان ورودی به آند

Fig. 5. The influence of anode inlet temperature variation on first and second law efficiencies of the trigeneration system

در شکل ۶ چگونگی تغییر نرخ تخریب اگزرژی اجزای مختلف با تغییرات دمای جریان ورودی به آند، نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بالاترین میزان تخریب اگزرژی به پس‌سوز تعلق دارد و پیل سوختی و باز یاب حرارتی در رده دوم و سوم قرار دارند. با بالا رفتن دمای جریان ورودی به آند نرخ تخریب اگزرژی در پس‌سوز و پیل سوختی کاهش یافته است، در حالی که این نرخ در باز یاب حرارتی افزایش می‌یابد. افزایش دمای جریان ورودی به آند به معنای افزایش دمای کاری پیل سوختی است و موجب کاهش افت ولتاژها و افزایش ولتاژ کاری پیل سوختی می‌شود. که این به معنای افزایش توان تولیدی پیل سوختی و کاهش نرخ اگزرژی تخریبی است. به دنبال افزایش دمای جریان ورودی به آند، دمای جریان سردشونده ورودی به

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
c	هزینه واحد انرژی، $\$/GJ$
CRF	ضریب بازگشت سرمایه
D	ضریب نفوذ، $m^2.s^{-1}$
\bar{e}_x	انرژی مخصوص مولی، $J.mol^{-1}$
\dot{E}_x	نرخ انرژی، W
F	ثابت فارادی
f	فراوانی اجزای شیمیایی داخل سیستم
\bar{g}	انرژی گیبس مخصوص مولی، $J.mol^{-1}$
G	انرژی گیبس، J
\bar{h}	آنالژی مخصوص مولی، $J.mol^{-1}$
I	شدت جریان، A
j	چگالی جریان، $A.m^{-2}$
K_s	ثابت تعادلی واکنش
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت، $kJ.kg^{-1}$
N_{FC}	تعداد صفحات پیل سوختی
\dot{n}	نرخ جریان مولی، $mol.s^{-1}$
P	چگالی توان خروجی از پیل سوختی، $W.m^{-2}$
p	فشار جزئی، kPa
Q	حرارت، J
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت، W
\bar{R}	ثابت جهانی گازها، $J.mol^{-1}.K^{-1}$
R_Q	مقاومت الکترولیت، $\Omega.m$
\bar{s}	آنترپی مخصوص مولی، $J.mol^{-1}.K^{-1}$
S	آنترپی، $J.K^{-1}$
SCR	کمترین نسبت مولی بخار به کربن
T	دما، K
U_f	ضریب مصرف سوخت
U_o	ضریب مصرف هوا
V	ولتاژ، V
W	کار، J
\dot{W}	توان، W
y	کسر مولی اجزاء شیمیایی
\dot{Z}_k	میزان کل هزینه صرف شده، $\$/GJ$

زیر نویس

a	آند
act	فعال سازی
AB	پس سوز
AC	جریان متناوب
c	کاتد، مدار بسته
con	غلظتی
C	کمپرسور
DC	جریان مستقیم
e	الکتریکی، کاری
eva	اواپراتور
FC	پیل سوختی
G	ژنراتور
HE	مبدل حرارتی
INV	مبدل جریان مستقیم به متناوب
MC	محفظه اختلاط
N	مدار باز، نرنست
T	توربین

اما میزان کاهش دبی هوای مصرفی به مراتب بیشتر است و موجب کاهش کار مصرفی پمپها و کمپرسورها و نیز مساحت مبدل‌های حرارتی است. این امر منجر به افزایش کار خالص می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

از مطالعه سیستم تولید سه‌گانه پیشنهادی بر اساس پیل سوختی اکسید جامد با ریفورمر خارجی و سیستم تبرید گس و بازیاب حرارتی که از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی‌اقتصادی صورت گرفت، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- بازده قانون اول سیستم تولید سه‌گانه نسبت به بازده پیل سوختی به تنهایی، بیش از ۳۸٪ افزایش داشته است.

- افزایش ضریب بهره‌وری سوخت افزایش تقریباً ۱۲٪ تمامی بازده‌های قانون دوم را به دنبال دارد. تاثیر افزایش دمای جریان ورودی به آند بر بازده‌های قانون دوم نیز مثبت است و موجب افزایش ۸٪ بازده‌ها می‌شود.

- در هر دو حالت مورد بررسی بالاترین میزان تخریب انرژی از پس‌سوز، پیل سوختی و بازیاب حرارتی تعلق دارد. استفاده از تجهیزات با کارایی بالاتر می‌تواند موجب کاهش چشمگیر تخریب انرژی در این سیستم شود.

- بالا بردن ضریب بهره‌وری سوخت موجب کاهش هزینه واحد توان تولیدی از $\$/GJ$ ۲۵/۳۴ به $\$/GJ$ ۲۳/۴۲ می‌شود. همین‌طور میزان تخریب انرژی در پس‌سوز و بازیاب را کاهش می‌دهد در حالی که روند تخریب انرژی در پیل سوختی صعودی است.

- نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد بالا بردن دمای جریان ورودی به آند موجب نزولی شدن روند تخریب انرژی در پس‌سوز و پیل سوختی می‌شود در حالی که بر روی بازیاب حرارتی تأثیری معکوس دارد.

- با افزایش دمای جریان ورودی به آند، هزینه واحد توان تولیدی روند نزولی دارد و از $\$/GJ$ ۲۳/۸۶ به $\$/GJ$ ۲۱/۷۶ کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم یونانی

η	بازده
ψ	بازده انرژی
τ	ضخامت، m
δ	ضخامت الکترولیت، m
ρ	چگالی، $kg.m^{-3}$

Greenhouse gas emission and exergy analyses of an integrated trigeneration system driven by a solid oxide fuelcell, *Applied Thermal Engineering*, (2015).

- [11] F. Ranjbar, A. Chitsaz, S. M. Mahmoudi, SH. Khalilarraya, M. Rosen, Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a SOFC, *Energy Conversion and Management*, 87(1) (2014) 318-327.
- [12] M. wang, Y. Zhequan, Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heat and power system driven by solid oxide fuel cell based on ammonia, *Journal of Power Sources*, 196(1) (2011) 8463-8471.
- [13] I. Dincer, Energy and Exergy analyses of direct ammonia solid oxide fuel cell integrated with gas turbine power cycle, *Journal of Power Sources*, 212(1) (2012) 73-85.
- [14] P. Leone, A. Ianzini, G.A. Ortigoza-Villalba, R. borchiellini, operation of a solid oxide fuelcell under direct internal reforming of liquid fuels, *Chemical Engineering Journal*, 191(1) (2012) 349-355.
- [15] D. Cocco, V. Tola, Externally reformed solid oxide fuel cell- microgas turbine hybrid systems fueled by methanol and di methyl ether, *Energy*, 34 (2009) 2124-2130.
- [16] C. Su, R. Ran, W. Wang, Z. Shao, Coke formation and performance of an intermediate-temperature solid oxide fuel cell operating on dimethyl ether fuel, *Power Source*, 196 (2011) 1967-1974.
- [17] P.V. Snytnikov, S.D. Badmaev, G.G. Volkova, D.I. Potemkin, M.M. Zyryanova, Catalysts for hydrogen production in a multifuel processor by methanol, dimethyl ether and bioethanol steam reforming for fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (2012) 16388-16396.
- [18] K. Sato, Y. Tanaka, A. Negishi, T. Kato, Dual fuel type solid oxide fuel cell using dimethyl ether and liquefied petroleum gas as fuels, *Power Source*, 217 (2012) 37-42.
- [19] V. Zare, S. Mahmoudi, M. Yari, M. Amidpour, Thermo-economic analysis and optimization of an

منابع و مراجع

- [1] Energy Information Administration, *International Energy Outlook*, U.S.A, (2009).
- [2] CHP: Evaluating the benefits of greater global investment, *International Energy Agency*, France, (2008).
- [3] T. Kerr, CHP and emissions trading options for policy makers, *International Energy Agency*, USA, (2008).
- [4] Office of Administration U.S. Environmental Protection Agency, Laboratories for the 21st Century, Energy Efficiency Resources Management In partnership with the U.S. Department of Energy, and Renewable Energy. On-site power systems for laboratories, (2003).
- [5] EG, G-Services & National Energy Technology Laboratory (U.S.), Fuel Cell Handbook. Morgantown, WV: U.S. Dept. of Energy, Office of Fossil Energy, *National Energy Technology Laboratory*, (2004).
- [6] M. Burer, K. Tanaka, Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers, *Energy*, 28(6) (2003) 497-518.
- [7] C. Weber, M. Koyama, S. Kraines, CO₂-emissions reduction potential and costs of a decentralized energy system for providing electricity, cooling and heating in an office-building in Tokyo, *Energy*, 31(14) (2006) 2705-2725.
- [8] M. Zenouzi, G. J. Kowalski, Selection of distributed power-generating systems based on electric, heating, and cooling loads, *Journal of Energy Resources Technology*, 128(3) (2006) 268-177.
- [9] J. J. Wang, Y. Y. Jing, C. F. Zhang, A fuzzy multicriteria decision-making model for trigeneration system, *Energy Policy*, 36(10) (2008) 3823-3832.
- [10] A. Chitsaz, S. M. Mahmoudi, M. Rosen,

- of a novel trigeneration system based on a SOFC, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014) 318-327.
- [27] Y. lee, K. Ahn, T. Morosuk, Exergetic and exergoeconomic evaluation of a solid- oxide fuel-cell-based combined heat and power generation system, *Energy Conversion and Management*, 85 (2014) 154-64.
- [28] B. Najafi, A. Shirazi, M. Aminyavari, F. Rinaldi, R. Taylor, Exergetic, economic and enviromental analyses and multi- objective optimization of an SOFC-gas turbine hybrid cycle coupled with an MSF desalination system, *Desalination*, 334(1) (2014) 46-59.
- [29] Y. D. Lee, Thermodynamic, econmic and enviromental evaluation of solid oxide fuel cell hybrid power generation system, Berlin University, Berlin, (2015).
- [30] A. Mehr, V. Zare, S.M. Mahmoudi, Standard GAX versus hybrid GAX absorption refrigeration cycle: from the view of thermoeconomics, *Energy Conversion and Management*, 76(1) (2013) 68-82.
- [31] S. Assabumrungrat, W. Sangtongkitcharoen, Effects of electrolyte type and flow pattern on performance of methanol-fuelled solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, (2005) 18-23.
- [32] S. Singhal, High temperature SOFCs fundamentals, design and applications, *Elsevier*, (2003).
- ammonia- water power/cooling cogeneration cycle, *Energy*, 47(1) (2012) 271-283.
- [20] F. Calise, M. Dentice d'Accadia, L. Vanoli, M. Von Spakovsky, single elvel optimization of a hybrid SOFC-GT power plant, *Power Source*, 159(2) (2006) 1169-1185.
- [21] T. Semelsberger, R. Broup, Thermodynamic equilibrium calculations of dimethyl ether steam reforming and dimethyl ether hydrolysis, *Power Sources*, 152(1) (2005) 87-96.
- [22] Y. Lwin, W. Wan Daud, A. Mohammad, Z. Yaakob, Hydrogen production from steam-methanol reforming: thermodynamic analysis, *Hydrogen Energy*, 25 (2000) 47-53.
- [23] I. Fishtik, A. Alexander, R. Datta, D. Geana, A thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming of ethanol via response reactions, *Hydrogen Energy*, 25 (2000) 31-45.
- [24] D. Cocco, V. Tola, Use of alternative hydrogen energy carriers in SOFC–MGT hybrid power plants, *Energy Conversion and Management*, 50 (2009) 1040-1048.
- [25] G. Tao, T. Armestrang, A. Vikar, Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell (IT-SOFC) Research and Development Activities at MSRI, *Nineteenth Annual ACERC and ICES Confrence*, UT, USA, (2005).
- [26] F. Ranjbar, A. Chitsaz, S.M. Mahmoudi, Sh. Khalil Arrya, M. Rosen, Energy and exergy assessments

