

## تحلیل عملکرد ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی یک سیستم تولید همزمان مقیاس کوچک با مولد پیل سوختی اکسید جامد

در این مقاله ابتدا یک سیستم تولید همزمان بر پایه پیل سوختی اکسید جامد معرفی گردیده و سپس اثرات چند پارامتر تاثیرگذار از قبیل دما، فشار، چگال جریان و همچنین نرخ جریان هوا به سوخت ورودی بر عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی عملکرد سیستم، ابتدا برای پیل سوختی به-کار رفته یک مدل الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی دقیقی ارائه شده و سپس نمودار توان تولیدی آن در شرایط مختلف کاری به دست آورده شده است. به دست آوردن توان و راندمانهای الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم در شرایط مختلف کاری پیل، تعیین نسبت هوا به سوخت بهینه در پیل و همچنین مقایسه اقتصادی سیستم پیشنهادی با سایر سیستمهای مشابه تولید توان از دیگر نتایج این تحقیق است. نتایج نهایی نشان می‌دهد که با استفاده از یک سیستم تولید همزمان بر پایه یک پیل سوختی اکسید جامد می‌توان به راندمان کلی حدود ۷۰ الی ۷۵ درصد دست یافت. در مورد کارکرد سیستم پیشنهادی نیز می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که انتخاب شرایط کارکرد سیستم با توجه به توان الکتریکی و حرارتی مورد نیاز ساختمان مشخص می‌گردد.

جاماسب پیرکندی<sup>۱</sup>  
استادیار

مجید قاسمی<sup>۲</sup>  
استاد

محمد حسین حامدی<sup>۳</sup>  
استاد

واژه های راهنما : تولید همزمان، پیل سوختی، تحلیل اقتصادی، راندمان، آنروپی

### ۱- مقدمه

سیستم‌های تولید همزمان سیستم‌هایی هستند که با استفاده از یک منبع انرژی اولیه قادر به تولید دو یا چند شکل انرژی مفید باشند. این سیستم‌ها چنانچه به‌طور صحیح طراحی و بهره‌برداری شوند، می‌توانند باعث صرفه‌جویی انرژی گردند، زیرا بازده آنها از بازده تولید جداگانه برق و حرارت بالاتر است. بالا بودن بازده، کاهش آلاینده‌گی و سروصدای کم‌تر از مزایای کلی سیستم‌های تولید همزمان می‌باشد. میکروتوربین‌ها و مینی‌توربین‌های گازی، موتورهای پیستونی، موتورهای استرلینگ و پیل‌های سوختی از جمله سیستم‌های

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر [j\\_pirkandi@dena.kntu.ac.ir](mailto:j_pirkandi@dena.kntu.ac.ir)

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی [ghasemi@kntu.ac.ir](mailto:ghasemi@kntu.ac.ir)

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی [hamedi@kntu.ac.ir](mailto:hamedi@kntu.ac.ir)

می‌باشند که امروزه جهت تولید همزمان حرارت و برق مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با توجه به مزایای پیل‌های سوختی طی چند دهه اخیر تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد آنها در سیستم‌های تولید همزمان انجام شده است.

فن‌آوری پیل‌سوختی که در آن هیدروژن طی یک سری واکنش‌های الکتروشیمیایی با اکسیژن تولید توان الکتریکی و حرارت می‌کند، یکی از بهترین گزینه‌های تولید انرژی در سیستم‌های تولید همزمان محسوب می‌شود. پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، دانسیته توان بالا، عدم وجود قطعات متحرک و عدم ایجاد ارتعاش و صدا تجهیزات مطلوبی برای تولید انرژی به حساب می‌آیند. یکی از انواع مهم و پرکاربرد پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد. دمای عملکردی بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد (محدوده دمایی ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس) سبب شده است تا در این نوع پیل‌ها سوخت‌های متنوعی نظیر گاز طبیعی را به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار داد. علاوه بر این گرمای تولید شده در این نوع از پیل‌های سوختی دارای کیفیت بالایی بوده و قابلیت استفاده در بیشتر سیستم‌های تولید همزمان را دارا می‌باشد [۲].

از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به فعالیت‌های هاوکز و همکاران اشاره کرد. آنها سه نوع سیستم تولید همزمان توربین گازی، موتور استرلینگ و پیل سوختی را از لحاظ اقتصادی مورد بررسی قرار دادند [۳ و ۱]. ولکان و همکارانش در تحقیقی از گاز هیدروژن به عنوان سوخت ورودی به پیل استفاده نمودند. آنها در این تحقیق دو ترکیب مختلفی از سوخت را که شامل نسبت‌های مختلفی از هیدروژن و آب بود، را بررسی کرده و سپس نتایج آنها را با هم مقایسه کردند [۴]. آنها در تحقیق دیگری ترکیب پیل سوختی و توربین گاز را به عنوان یک سیستم تولید همزمان از دیدگاه انرژی مورد بررسی قرار دادند [۵]. زینک و همکارانش نیز ترکیب پیل سوختی اکسید جامد و چیلر جذبی را از دیدگاه ترمودینامیکی و ترمو اقتصادی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۶]. فرهاد و همکاران وی ترکیب انواع مختلف سوخت را بر روی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۷]. لیو [۸]، براون [۹]، فونتل [۱۰]، بارلی و همکاران [۱۱] و پیرکندی و همکاران [۱۲] نیز تحقیقات خوبی در زمینه کاربرد پیل سوختی اکسید جامد در سیستم‌های تولید همزمان ارائه کرده‌اند.

هدف از این مقاله معرفی یک سیستم تولید همزمان بر پایه یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای می‌باشد. جهت بررسی دقیق عملکرد پیل سوختی، ابتدا یک مدل الکتروشیمیایی برای پیل سوختی ارائه شده و پس از محاسبه ولتاژ و توان خروجی پیل تحلیل‌های حرارتی و ترمودینامیکی مجزایی بر روی آن صورت گرفته است. انجام همزمان سه تحلیل الکتروشیمیایی، حرارتی و ترمودینامیکی می‌تواند باعث به‌دست آوردن نتایج دقیق و کاملی از عملکرد پیل سوختی در سیستم تولید همزمان پیشنهادی گردد. در بخش پایانی نیز سیستم پیشنهادی از دیدگاه اقتصادی با یک سیستم تولید همزمان میکروتوربین گازی مقایسه و نتایج مربوط به آن ارائه شده است.



گرمای تولید شده می‌توان جهت ایجاد برودت و تامین بار سرمایشی در یک چیلر و همچنین تامین آب گرم بهداشتی ساختمان استفاده نمود. از انرژی الکتریکی تولید شده در پیل سوختی نیز می‌توان جهت تامین بار الکتریکی ساختمان از قبیل سیستم روشنایی، برق تجهیزات جانبی (مانند کمپرسورها، پمپ‌ها، چیلرهای تراکمی و ...) بهره برد. جهت بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از این سیکل، برای یک ساختمان نمونه ۱۰۰ متری در یک منطقه با آب و هوای معتدل محاسبات بارگرمایشی و سرمایشی، بار آبگرم بهداشتی و همچنین محاسبات توان الکتریکی مورد نیاز ساختمان صورت گرفت. طبق محاسبات انجام شده مقدار بار گرمایشی لازم جهت ساختمان اشاره شده در حدود ۱۷ کیلووات و بار الکتریکی آن نیز در حدود ۸ کیلووات تخمین زده شد.

### ۳- فرضیات

- در مدلسازی و تحلیل سیستم پیشنهادی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.
- از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرف نظر شده است،
- جریان سیال در کلیه اجزاء سیکل پایدار در نظر گرفته شده است،
- رفتار تمامی گازهای موجود در سیکل به صورت گاز ایده‌ال فرض شده است،
- از توزیع دما، فشار و اجزاء شیمیایی درون پیل صرف نظر شده است،
- سوخت درون پیل سوختی با ریفرمینگ داخلی تبدیل به هیدروژن می‌گردد.

### ۴- روش حل و روابط حاکم بر مساله

ابتدا با استفاده از روابط موجود، عملکرد تمامی اجزاء به کار رفته در سیستم پیشنهادی معرفی شده و در ادامه به صورت مجزا و تحت شرایط پایدار، سیستم فوق مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. جهت انجام کاریک برنامه رایانه‌ای نوشته شده و عملکرد ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی سیستم با تغییر چند پارامتر موثر مانند دما و فشار کاری پیل، چگالی جریان پیل و نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم، بررسی شده است.

#### ۴-۱- مدلسازی پیل سوختی

با توجه به اینکه بخش اصلی سیستم تولید همزمان پیشنهادی پیل سوختی می‌باشد، جهت بالابردن دقت نتایج به دست آمده محاسبات این بخش به طور کامل و در سه بخش مجزا انجام گرفته است.

#### ۴-۱-۱- محاسبات ریفرمینگ

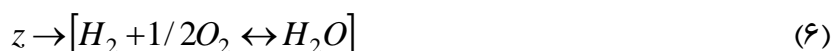
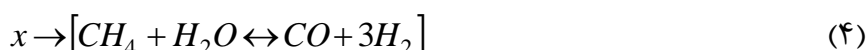
یک مشخصه مثبت برای پیل‌های سوختی اکسید جامد توانایی استفاده همزمان از هیدروژن و مونوکسید کربن به عنوان سوخت است. این نکته که می‌توان با استفاده از یک فرآیند ریفرمینگ داخلی، مونوکسید کربن و متان ورودی به پیل را در داخل آن به هیدروژن تبدیل کرد، بسیار حائز اهمیت است. فعل و انفعال صورت گرفته در فرایند ریفرمینگ به شدت گرماگیر بوده و حرارت مورد نیاز خود را از پیل تامین می‌کند. با توجه به موارد فوق واکنش‌های انجام یافته در این فرآیند به صورت زیر می‌باشند [۱۳ و ۱۴]:



روابط (۱) و (۲) به ترتیب واکنش ریفرمینگ (به‌سازی) و شیفتینگ (دگرگونی آب و گاز) نامیده می‌شوند. طبق واکنش‌های فوق، گاز طبیعی متان در داخل پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و سپس طبق رابطه زیر در واکنش الکتروشیمیایی پیل شرکت خواهد کرد [۲]:



مکانیزم واکنش ریفرمینگ و شیفتینگ داخلی متان در پیل سوختی طبق معادلات تعادلی زیر می‌باشد [۱۴]:



در روابط بالا  $x$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب نرخ مولی پیشرفت واکنش‌های ریفرمینگ، شیفتینگ و واکنش کلی پیل می‌باشد. با موازنه جرمی گازهای مختلف در تعادل، طبق روابط ذیل نرخ مولی گازهای خروجی از پیل به‌دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} [\dot{n}_{CH_4}]^{out} &= [\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x \\ [\dot{n}_{H_2O}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z \\ [\dot{n}_{H_2}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z \\ [\dot{n}_{CO}]^{out} &= [\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y \\ [\dot{n}_{CO_2}]^{out} &= [\dot{n}_{CO_2}]^{in} + y \\ [\dot{n}_{tot}]^{out} &= [\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به معادلات بالا، فشار جزئی گازهای خروجی از آند و کاتد با استفاده از رابطه زیر حاصل خواهد شد.

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}} P_{tot} \quad (8)$$

واکنش‌های ریفرمینگ و شیفتینگ واکنش‌های تعادلی بوده و مقدار اجزاء آنها بستگی به ترکیب اولیه و دمای نهایی واکنش‌ها دارد. رابطه بین مقدار اجزای در تعادل، ترکیب تعادل و دمای نهایی آن توسط ثابت تعادل برقرار می‌شود. برای دو واکنش ریفرمینگ و شیفتینگ ثابت‌های تعادل به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۴]:

$$Kp, r = \frac{P_{H_2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (9)$$

$$Kp, s = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (10)$$

با توجه به روابط (۷) الی (۱۰)، دو رابطه غیر خطی زیر حاصل خواهد شد:

$$Kp, r = \frac{([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z)^3 \times ([\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y)}{([\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z)} \times \frac{P_{cell}^2}{([\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x)^2} \quad (11)$$

$$Kp, s = \frac{([\dot{n}_{CO_2}]^{in} + y) \times ([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z)}{([\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z)} \quad (12)$$

ثابت تعادل برای یک مخلوط گاز ایده‌ال فقط تابعی از دما بوده و برای دو واکنش ریفورمینگ و شیفتینگ، به صورت یک تابع چند جمله‌ای و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\text{Log } Kp = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (13)$$

در رابطه بالا  $A, B, C, D$  و  $E$  ثابت‌های تجربی می‌باشند [۱۴].

جهت محاسبه مقادیر  $x, y$  و  $z$  علاوه بر دو رابطه (۱۱) و (۱۲) نیاز به یک رابطه دیگر وجود دارد که این رابطه بر اساس تعریف ضریب مصرف سوخت در پیل به دست می‌آید (رابطه (۱۴)). در رابطه اشاره شده  $U_f$  ضریب مصرف سوخت بوده و به صورت نسبت هیدروژن واکنش داده در آند به هیدروژن ورودی به آند تعریف می‌شود [۱۴].

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \rightarrow z = U_f \times (3x + y) \quad (14)$$

با محاسبه دستگاه معادلات غیر خطی شامل معادلات (۱۱)، (۱۲) و (۱۴) می‌توان مقدار و ترکیب گازهای خروجی از پیل را مشخص کرد.

#### ۴-۱-۲- محاسبات الکتروشیمیایی

حل کلی معادلات بقای جرم و انرژی پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولید شده در آن دارد. ولتاژ برگشت پذیر پیل سوختی توسط معادله نرنست و به شکل زیر تعریف می‌گردد [۱۷-۱۵]:

$$E = E^\circ + \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta G_0^\circ}{n_e F} \quad (16)$$

در رابطه بالا  $E^\circ$  ولتاژ پیل سوختی در شرایط استاندارد،  $R_u$  ثابت عمومی گازها،  $T$  دمای توده پیل،  $F$  ثابت فارادی و  $n_e$  تعداد الکترون‌های جریان یافته در مدار به ازای تشکیل هر مولکول آب می‌باشد. جهت محاسبه ولتاژ واقعی پیل باید افت‌های مربوط به پیل (اضافه ولتاژ پیل) که شامل افت ولتاژ ناحیه فعالسازی ( $V_{act}$ )، افت ولتاژ ناحیه اهمی ( $V_{ohm}$ ) و افت ولتاژ ناحیه غلظت ( $V_{conc}$ ) می‌باشند، محاسبه شده و در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن ( $V_c$ ) به دست آید [۱۷-۱۵]:

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) = E - \Delta V_{Loss} \quad (17)$$

مقدار افت فعال‌سازی شامل افت‌های مربوط به راه‌اندازی پیل و همچنین غلبه بر کلیه واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد. مقدار این افت برابر مجموع اضافه ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد پیل بوده و با ساده‌سازی رابطه بالتر-ولمر طبق روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۷-۱۵]:

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (18)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_o} \right) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)،  $i_o$  و  $i$  به ترتیب برابر چگالی جریان و چگالی جریان تبدیلی می‌باشند. محاسبه مقدار چگالی جریان تبدیلی بسیار پیچیده بوده و برای آند و کاتد یک پیل سوختی اکسید جامد از دو رابطه نیمه تجربی زیر به دست می‌آید [۱۷-۱۵]:

$$i_{o,an} = \gamma_{an} \left( \frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left( - \frac{E_{act,an}}{R_u T} \right) \quad (20)$$

$$i_{o,ca} = \gamma_{ca} \left( \frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left( - \frac{E_{act,ca}}{R_u T} \right) \quad (21)$$

در روابط بالا،  $\gamma$  پارامتری است که مقدار آن به جنس الکترواد آند و کاتد بستگی داشته و  $E$  مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد [۱۷-۱۵].

مقاومت‌های ناشی از حرکت الکترون‌ها در آند، کاتد و متصل‌کننده داخلی و حرکت یون‌ها در الکتrolیت سبب ایجاد افت ولتاژ اهمی می‌شود. بر این اساس افت یا اضافه ولتاژ اهمی برای آند، کاتد، متصل‌کننده‌های داخلی و الکتrolیت با استفاده از روابط زیر به دست خواهند آمد [۱۷-۱۵]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (22)$$

$$V_{ohm} = ir \quad (23)$$

$$r = \delta \rho \quad (24)$$

$$\rho = A \exp \left( \frac{B}{T} \right) \quad (25)$$

مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $\delta$  پارامترهای ثابتی بوده که وابسته به نوع پیل به دست می‌آیند (جدول ۱).

جدول ۱- پارامترهای مربوط به افت ولتاژ اهمی [۱۵-۱۳]

اجزاء	$A(\Omega \cdot m)$	$B(K)$	$\delta(m)$
کاتد	۰/۰۰۰۰۸۱۱	۶۰۰	۰/۰۰۲۲
آند	۰/۰۰۰۰۲۹۸	-۱۳۹۲	۰/۰۰۰۱
الکتrolیت	۰/۰۰۰۰۲۹۴	۱۰۳۵۰	۰/۰۰۰۰۴
جداکننده‌ها	۰/۰۰۱۲	۴۶۹۰	۰/۰۰۰۰۸۵

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته شود، فشار جزئی هیدروژن و هوا کاهش پیدا می‌کند. به بیان دیگر در این حالت نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق نداشته و باعث افت ولتاژ شدید در پیل می‌گردد. افت

مربوط به غلظت در چگالی جریان‌های بالا اهمیت پیدا می‌کند. مقدار این افت با استفاده از روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۷-۱۵].

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca} \quad (26)$$

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1 - i / i_{L, H_2}}{1 + i / i_{L, H_2 O}} \right) \quad (27)$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1}{1 - i / i_{L, O_2}} \right) \quad (28)$$

در روابط بالا  $i_L$  چگالی جریان حدی است. عموماً باید سعی شود که عملکرد پیل هیچگاه به این منطقه نزدیک نشود. بر خلاف بیشتر تحقیقات انجام شده، در این مقاله جهت محاسبه دقیق عملکرد پیل، مقدار این پارامتر در شرایط مختلف کاری به دست آورده شده است [۱۷-۱۵]. پس از محاسبه افت ولتاژهای اشاره شده مقدار ولتاژ واقعی پیل طبق رابطه (۱۷) به دست خواهد آمد. با مشخص بودن رابطه بین چگالی جریان و سطح پیل مقدار جریان و توان هر پیل و توده نیز به دست خواهد آمد.

$$I_{cell} = i A_{cell} \quad (29)$$

$$Power_{DC-cell} = V_{cell} \times I_{cell} \quad (30)$$

$$I_{tot} = 2Fz \quad (31)$$

$$Power_{DC-tot} = V_{cell} I_{tot} \quad (32)$$

$$Power_{AC-tot} = Power_{DC-tot} \times \eta_{inv} \quad (33)$$

در رابطه بالا  $\eta_{inv}$  ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب می‌باشد.

#### ۴-۱-۳- محاسبات حرارتی

دمای گازهای خروجی از پیل می‌تواند با موازنه انرژی و همچنین استفاده از روش تکرار، محاسبه گردد. با توجه به اینکه واکنش ریفورمینگ گرماگیر بوده و واکنش شیفیتینگ گرمازا می‌باشد، لذا انتقال حرارت انجام شده در پیل سوختی اکسید جامد طی دو فرآیند اشاره شده طبق روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۴].

$$Q_r = x(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (34)$$

$$Q_{sh} = y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (35)$$

گرمای حاصل از واکنش الکتروشیمیایی انجام شده در پیل سوختی اکسید جامد نیز طبق معادله زیر به دست می‌آید [۱۴].

$$Q_{elec} = z.T.\Delta S - I.\Delta V_{Loss} \quad (36)$$

گرمای خالص باقیمانده از واکنش‌های ریفورمینگ، شیفیتینگ و الکتروشیمیایی در پیل سوختی طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$Q_{net} = Q_{elec} + Q_{sh} - Q_r \quad (37)$$



مطابق رابطه (۳۸)، مقدار از این گرمای خالص باقیمانده صرف افزایش دمای گازهای داخل ( $Q'$ ) و خروجی ( $Q''$ ) پیل شده و بخش دیگری نیز به محیط ( $Q_{surr}$ ) وارد می‌شود.

$$Q_{net} = Q' + Q'' + Q_{surr} \quad (38)$$

$$(n_{ca} \bar{h}_{ca} + n_{an} \bar{h}_{an})_{in} = Q_{surr} + Q' + W_{out} + (n_{ca} \bar{h}_{ca} + n_{an} \bar{h}_{an})_{out} \quad (39)$$

با توجه به اینکه کاهش آنتروپی تولیدی در سیستم یکی از اهداف اصلی طراحی سیستم‌های حرارتی می‌باشد، در انتهای این بخش نیز میزان نرخ تولید آنتروپی در پیل سوختی طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{s}_{gen,sofc} = (n_{ca} \bar{s}_{ca} + n_{an} \bar{s}_{an})_{out} - (n_{ca} \bar{s}_{ca} + n_{an} \bar{s}_{an})_{in} + \frac{Q_{surr}}{T_{surr}} + \frac{Q'}{T_{cell}} \quad (40)$$

#### ۴-۲- مدل‌سازی کمپرسورهای هوا و سوخت

مطابق شکل (۱) هوای محیط در یک فشار و دمای معین ( $T_1, P_1$ ) وارد کمپرسور شده و پس از تراکم در فشار و دمای بالاتر ( $T_2, P_2$ ) آن را ترک می‌کند. با فرض آدیاباتیک بودن فرآیند تراکم و با مشخص بودن نسبت فشار ( $rp$ ) و راندمان کمپرسور ( $\eta_c$ ) و نسبت گرمای ویژه هوا ( $k_a$ ) می‌توان دمای گازهای خروجی از کمپرسور ( $T_2$ ) و همچنین کار واقعی مورد نیاز آن ( $w_c$ ) را از روابط زیر به دست آورد [۱۸].

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_a-1}{k_a}} = (rp)^{\frac{k_a-1}{k_a}} \quad (41)$$

$$\eta_{ac} = \frac{w_{ac,s}}{w_{ac}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (42)$$

$$\dot{W}_{ac} = \dot{n}_a (\bar{h}_2 - \bar{h}_1) \quad (43)$$

آنتروپی تولید شده در طی فرآیند تراکم نیز طبق رابطه زیر حاصل خواهد شد [۱۸].

$$\dot{S}_{gen,ac} = \dot{n}_a (\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \quad (44)$$

محاسبات مربوط به کمپرسور سوخت نیز مشابه کمپرسور هوا می‌باشد.

#### ۴-۳- مدل‌سازی محفظه پس‌سوز

با توجه به اینکه تنها قسمتی از سوخت و هوای ورودی به سیستم در پیل سوختی مصرف می‌شوند، وجود یک محفظه پس‌سوز برای سیکل لازم می‌باشد. گازهای خروجی از پیل سوختی که شامل بخار آب، دی‌اکسیدکربن، هیدروژن، متان و مونوکسیدکربن در بخش آند و اکسیژن و نیتروژن مصرف نشده در کاتد می‌باشند، در محفظه پس‌سوز با هم واکنش می‌دهند. مجموع واکنش‌های فوق گرماده بوده و دمای گازهای خروجی از محفظه پس‌سوز را بالا می‌برند. با نوشتن معادله بقای انرژی و با در نظر گرفتن راندمان محفظه، می‌توان طبق روابط زیر دمای گازهای خروجی را محاسبه کرد [۱۸].

$$\dot{n}_{6,an} \bar{h}_{6,an} + \dot{n}_{6,ca} \bar{h}_{6,ca} - \dot{n}_7 \bar{h}_7 - \dot{Q}_{Loss} = 0 \quad (45)$$

در رابطه بالا  $\dot{Q}_{Loss}$  تلفات حرارتی محفظه پس سوز بوده و مقدار آن به راندمان محفظه ( $\eta_A$ ) بستگی دارد [۱۶]. مقدار آنتروپی تولیدی در این محفظه طبق رابطه زیر به دست می آید [۱۸]:

$$\dot{S}_{gen,ab} = \dot{n}_7 s_7 - \dot{n}_{6,an} s_{6,an} - \dot{n}_{6,ca} s_{6,ca} + \frac{\dot{Q}_{loss}}{T_{surr}} \quad (46)$$

در این تحقیق نسبت هوا و سوخت ورودی به سیستم به صورت استوکیومتری در نظر گرفته شده و با توجه به مصرف قسمت بیشتر سوخت در پیل، در محفظه پس سوز هوا دارای مقدار بیشتری بوده و در محصولات خروجی نیز اکسیژن ظاهر خواهد شد.

#### ۴-۴- مدلسازی بازیاب ها

جهت افزایش دمای هوا و سوخت ورودی به پیل و همچنین تامین آب گرم مورد نیاز، از سه بازیاب خارجی که توسط گازهای داغ خروجی از محفظه پس سوز تغذیه می شوند، استفاده شده است. همان طور که اشاره شد بخشی از انرژی حرارتی موجود در گازهای خروجی از محفظه پس سوز جهت گرم کردن هوا و سوخت ورودی به پیل شده و بخشی دیگر جهت تامین بارگرمایشی وارد یک بازیاب دیگر می گردد. دمای گازهای خروجی از بازیاب اول و دوم بر اساس راندمان یا ضریب کارایی آن بازیاب و طبق روابط (۴۷) و (۴۸) محاسبه می گردد [۱۸].

$$\varepsilon_{ah} = \frac{T_4 - T_2}{T_7 - T_2} \quad (47)$$

$$\varepsilon_{fh} = \frac{T_5 - T_3}{T_8 - T_3} \quad (48)$$

مقدار آنتروپی تولیدی در این بازیابها نیز طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{S}_{ah} = \dot{n}_{air} (\bar{s}_4 - \bar{s}_2) - \dot{n}_7 (\bar{s}_7 - \bar{s}_8) \quad (49)$$

$$\dot{S}_{fh} = \dot{n}_{fuel} (\bar{s}_5 - \bar{s}_3) - \dot{n}_7 (\bar{s}_8 - \bar{s}_9) \quad (50)$$

برای محاسبه بارحرارتی مفید در بازیاب سوم، با در نظر گرفتن راندمان این بازیاب از روابط ذیل استفاده شده است.

$$Q_{wh} = \varepsilon_{wh} \times \dot{n}_7 (\bar{h}_{T9} - \bar{h}_{T10}) \quad (51)$$

$$Q_{wh} = \dot{n}_{water} \bar{C}_p (T_{12} - T_{11}) \quad (52)$$

با استفاده از رابطه (۵۲) می توان مقدار آب گرم مورد نیاز برای سیستم های گرمایشی ساختمان را به دست آورد. در این رابطه دمای آب در خروجی بازیاب سوم در حدود ۹۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. این آب گرم شده جهت تغذیه سیستم های گرمایشی (هواساز، فن کویل و ...) یا سرمایشی ساختمان (چیلرهای جذبی) و همچنین تهیه آب گرم بهداشتی استفاده می شود. مقدار بار گرمایشی به دست آمده در بازیاب سوم جهت محاسبه راندمان حرارتی سیستم استفاده خواهد شد.

#### ۴-۵- مدلسازی پمپ

جهت تامین فشار آب در بازیاب سوم از یک پمپ استفاده شده است. پمپ طوری در نظر گرفته شده که بتواند فشار مورد نیاز سیستم گرمایشی را تامین کند. در این تحقیق نسبت فشار پمپ در حدود ۴ بار در نظر گرفته شده است. مقدار کار مورد نیاز پمپ بر اساس رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$\dot{W}_p = \dot{n}_{water} v_{13} (P_{11} - P_{13}) \quad (53)$$

مقدار آنتروپی تولیدی در پمپ ناچیز بوده و از آن صرف نظر شده است.

#### ۴-۶- مدلسازی سیستم

در این بخش با در نظر گرفتن کل سیستم پیشنهادی به عنوان یک حجم کنترل، راندمان‌های الکتریکی، حرارتی و کل آن، با استفاده از روابط زیر به دست خواهند آمد.

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{W}_{net} - \dot{W}_{ac} - \dot{W}_{fc} - \dot{W}_p}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (54)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{wh}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (55)$$

$$\eta_{tot} = \frac{\dot{W}_{net} - \dot{W}_{ac} - \dot{W}_{fc} - \dot{W}_p + \dot{Q}_{wh}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (56)$$

در روابط بالا مقدار توان خالص خروجی از سیستم برابر توان خالص خروجی از پیل سوختی بوده و مقدار انرژی ورودی به سیستم نیز برابر انرژی آزاد شده ناشی از مصرف سوخت در پیل و محفظه پس سوز می باشد.

$$\dot{W}_{net} = Power_{AC-tot} \quad (57)$$

نرخ تولید آنتروپی در کل سیستم برابر مجموع کل آنتروپی های تولید شده در تمام اجزاء سیستم می باشد.

$$S_{gen}^{cyc} = \sum_i S_{gen,i} \quad (58)$$

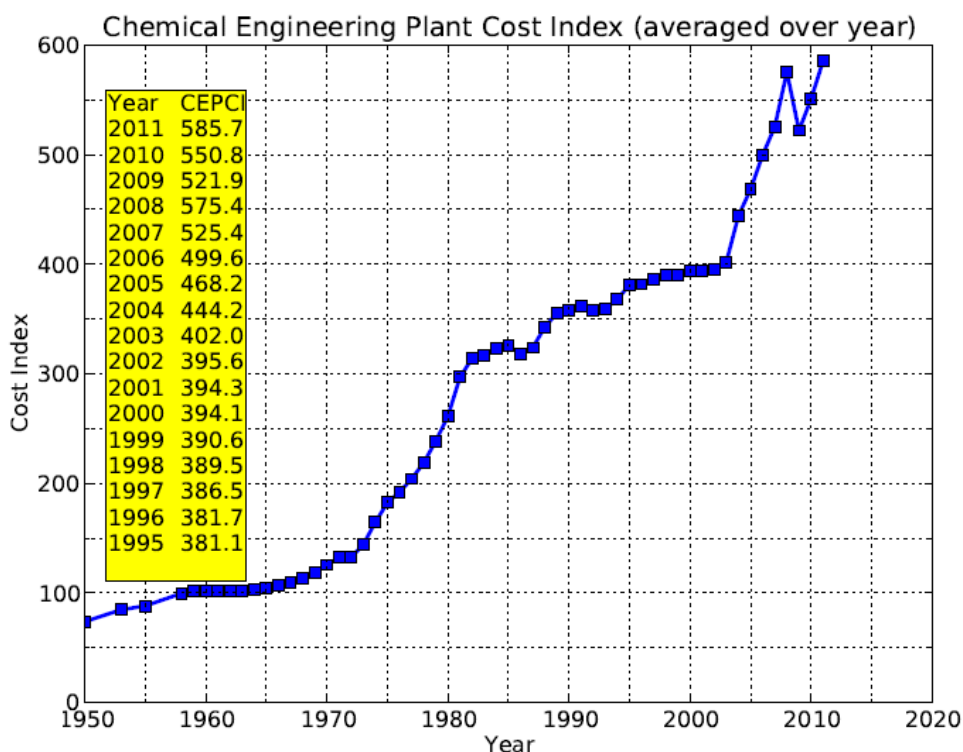
#### ۵- تحلیل اقتصادی

با توجه به اینکه بحث اقتصادی سیستم‌های تولید انرژی یک مساله مهم در انتخاب آنها می باشد، در این بخش روابط مربوط به تعیین قیمت سیستم پیشنهادی آورده شده است. تخمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری پیش از طراحی معمولاً با استفاده از اطلاعات قیمت قدیمی انجام می گیرد. این اطلاعات مرجع  $PEC_{ref}$  با استفاده از یک اندیس هزینه مناسب بروز رسانی می شوند، تا قیمت‌های روز  $PEC_{new}$  را نشان دهند.

$$PEC_{new} = PEC_{ref} \left( \frac{I_{new}}{I_{ref}} \right) \quad (59)$$

در رابطه فوق  $I_{ref}$  و  $I_{new}$  به ترتیب بیانگر اندیس هزینه جدید مربوط به زمان تخمین قیمت و اندیس هزینه در سال مرجع می باشند. در شکل (۲) نمودار مربوط به اندیس هزینه در سالهای اخیر آورده شده است [۱۹].

قیمت تجهیزات سیستم پیشنهادی با استفاده از روابط (۶۰) تا (۷۰) به دست خواهد آمد که این روابط برای سال (۱۹۹۴) میلادی برقرار است. همان طور که در بالا اشاره شد، برای به روز کردن این قیمت‌ها از نمودار شکل (۲) استفاده می‌شود. برای بروز کردن قیمت‌ها مطابق رابطه (۵۹) ابتدا باید مقدار مربوط به سال مورد نظر را به مقدار مربوط به سال (۱۹۹۴) تقسیم کرده و سپس عدد حاصل را در قیمت دستگاه ضرب نمود. پس از محاسبه قیمت تک تک تجهیزات می‌توان با جمع مجموع آنها قیمت کل این سیستم را در شرایط مختلف کاری به دست آورد.



شکل ۲- نمودار مربوط به اندیس هزینه‌ها [۱۹]

#### ۵-۱- تعیین قیمت کمپرسورها

- قیمت کمپرسور هوا [۲۰]

$$PEC_{comp,air} = \left( \frac{71.1 \dot{m}_a}{0.9 - \eta_{sc}} \right) \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\$) \quad (60)$$

- قیمت کمپرسور سوخت [۲۰]

$$PEC_{comp,fuel} = \left( \frac{71.1 \dot{m}_f}{0.9 - \eta_{sc}} \right) \left( \frac{P_3}{P_1} \right) \ln \left( \frac{P_3}{P_1} \right) \quad (\$) \quad (61)$$

## ۵-۲- تعیین قیمت پیل سوختی [۲۱]

- قیمت توده پیل سوختی

$$PEC_{SOFC} = A_{SOFC} [2.96T_{cell} - 1907] \quad (62)$$

- قیمت اینورتور

$$PEC_{inverter} = 10^5 \left( \frac{\dot{W}_{cell}}{500} \right)^{0.7} \quad (63)$$

- قیمت تجهیزات جانبی پیل

$$PEC_{SOFC,aux} = 0.1 PEC_{SOFC} \quad (64)$$

## ۵-۳- تعیین قیمت محفظه پس سوز [۲۰]

$$PEC_{ab} = \left( \frac{46.08 \dot{m}_{ab}}{0.995 - \frac{P_7}{P_6}} \right) [1 + \exp(0.018T_7 - 26.4)] (\$) \quad (65)$$

## ۵-۴- تعیین قیمت بازیابها [۲۰]

$$PEC_{ah} = 4122 \times \left( \frac{\dot{m}_g (h_7 - h_8)}{18 \times \Delta T_{lm,ah}} \right)^{0.6} \quad (66)$$

$$PEC_{fh} = 4122 \times \left( \frac{\dot{m}_g (h_8 - h_9)}{18 \times \Delta T_{lm,fh}} \right)^{0.6} \quad (67)$$

$$PEC_{wh} = 4122 \times \left( \frac{\dot{m}_g (h_9 - h_{10})}{18 \times \Delta T_{lm,wh}} \right)^{0.6} \quad (68)$$

## ۵-۵- تعیین قیمت پمپ [۲۱]

$$PEC_{pump} = 442 (\dot{W}_p)^{0.71} 1.41 f_\eta \quad (69)$$

$$f_\eta = 1 + \left( \frac{1 - 0.8}{1 - \eta_p} \right) \quad (70)$$

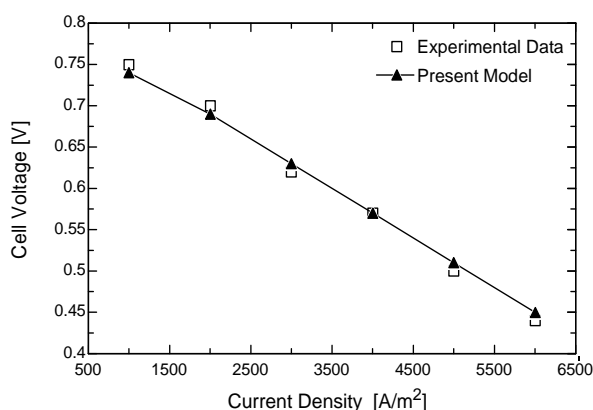
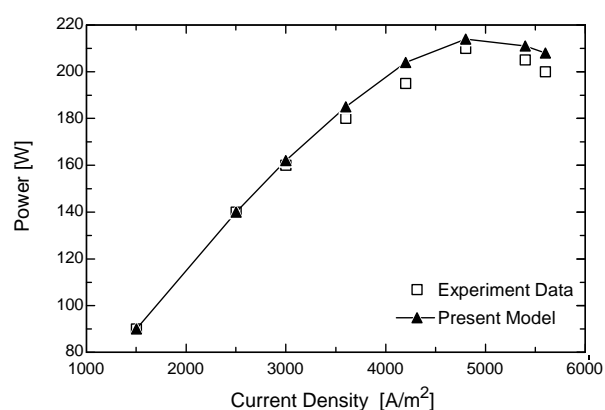
در این بخش برای تحلیل اقتصادی سیستم از روش نیازمندی درآمدی کل (TRR) استفاده شده است که این روش از فرایند پیشنهادی در مرکز تحقیقات تولید الکتریسیته سرمناشاء می گیرد. این روش تمام هزینه های پروژه که شامل میزان بازگشت سرمایه نیز می باشد را محاسبه می نماید. در این روش بر اساس فرضیات اقتصادی و محاسبه قیمت خرید تجهیزات و سوخت، درآمد نهایی مورد نیاز به صورت سال به سال محاسبه می شود. سرانجام تمام هزینه ها شامل هزینه تعمیرات و نگهداری و همچنین هزینه سوخت در طول دوره کارکرد سیستم به صورت سالانه همسطح سازی می شوند [۲۰].

## ۶- روش حل

با توجه به معادلات ذکر شده در بخش‌های قبلی، جهت تحلیل مساله یک برنامه رایانه‌ای در نرم افزار EES نوشته شده است. اطلاعات ورودی سیستم شامل نرخ جریان هوا و سوخت ورودی به سیستم و فشار کاری پیل می‌باشند. در بخش اول این کد، معادلات غیرخطی ریفرمینگ و الکتروشیمیایی به همراه معادلات حرارتی پیل به طور همزمان حل شده و نتایج مطلوب شامل ترکیبات اجزاء خروجی، دما، ولتاژ و توان در پیل سوختی حاصل می‌شود. در بخش دوم نیز کل سیستم هیبریدی از دیدگاه ترمودینامیکی و اقتصادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و راندمان، توان تولیدی، نرخ تولید آنتروپی و قیمت سیستم پیشنهادی در آن به دست آمده است.

## ۷- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی کد تهیه شده، لازم است برای یک نمونه معین نتایج حاصل از این کد تهیه شده با نتایج تست‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردد. با توجه به کمبود نتایج تجربی در زمینه پیل‌های سوختی اکسید جامد تغذیه شده با متان، در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [۲۲] به اعتبارسنجی کد تهیه شده در این پژوهش پرداخته شده است (شکل‌های (۳) و (۴)).



**شکل ۳-** مقایسه منحنی پلاریزاسیون نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی این پژوهش

**شکل ۴-** مقایسه منحنی توان نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی این پژوهش

نتایج آزمایشگاهی بر مبنای سوختی به دست آمده که از ۸۹ درصد هیدروژن و ۱۱ درصد آب تشکیل شده است [۲۲]. همان‌طور که در منحنی پلاریزاسیون شکل (۳) و توان شکل (۴) مشاهده می‌شود، همخوانی نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی صحت کد تهیه شده را نشان می‌دهد. در این آزمایش دما و فشار کاری پیل به ترتیب در حدود ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و ۱ بار در نظر گرفته شده است.

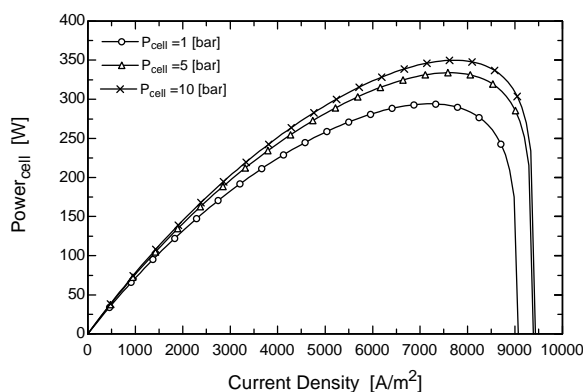
## ۸- نتایج

دما و فشار کاری پیل و چگال جریان در آن به همراه نسبت جریان هوا به سوخت ورودی به سیستم، به عنوان چند پارامتر تاثیرگذار بر عملکرد سیستم تولید همزمان پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. هدف بررسی تاثیر این پارامترها بر روی توان الکتریکی و حرارتی تولیدی در این سیستم می باشد. جهت تحلیل دقیق مساله ابتدا محاسبات کامل الکتروشیمیایی پیل سوختی انجام شده و سپس در ادامه کل سیستم پیشنهادی از دیدگاه ترمودینامیکی تحلیل خواهد شد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پیل سوختی به کار رفته در این تحقیق از نوع اکسید جامد لوله‌ای بوده که مشخصات آن به همراه سایر مشخصات سیستم تولید همزمان پیشنهادی در جدول (۲) ارائه شده است [۲۳].

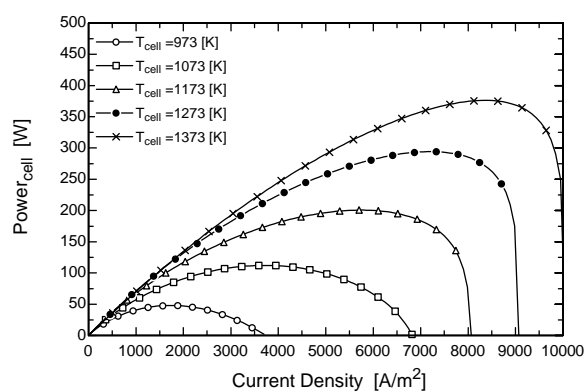
جدول ۲- فرضیات پارامترهای عملکرد سیستم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
مساحت هر پیل	۱۰۳۶/۲ سانتی متر مربع	راندمان کلی سیستم	۷۳/۶۳ درصد
طول هر پیل	۱۵۰ سانتی متر	راندمان الکتریکی سیستم	۴۹ درصد
قطر هر پیل	۲/۲ سانتیمتر	راندمان حرارتی سیستم	۲۴/۶۳ درصد
تعداد پیل	۵۷۴۹ عدد	افت فشار محفظه پس سوز	۳ درصد
چگالی جریان	۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع	افت فشار بازیاب‌ها	۲ درصد
دبی هوا	۱۰۰ کیلو مول بر ساعت	راندمان بازیاب‌های هوا و سوخت	۷۰ و ۸۵ درصد
دبی سوخت	۱۰/۶۳ کیلو مول بر ساعت	راندمان بازیاب آب	۷۵ درصد
ضریب مصرف سوخت	۰/۸۵	راندمان آیزنتروپیک کمپرسور سوخت	۹۰ درصد
افت فشار پیل	۵ درصد	راندمان آیزنتروپیک کمپرسور هوا	۷۰ درصد

در شکل‌های (۵) و (۶) تغییرات توان خروجی یک پیل نسبت به چگالی جریان آن در دو حالت مختلف بررسی شده است. در شکل (۵) با ثابت نگهداشتن فشار پیل عملکرد آن در دماهای مختلف عملکردی بررسی شده و در شکل (۶) نیز با ثابت نگهداشتن دما، کارکرد آن در فشارهای مختلف عملکردی به دست آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود افزایش دمای پیل باعث افزایش ولتاژ آن و در نتیجه افزایش کارایی آن می‌گردد و در چگالی‌های جریان بالا به ماکزیمم توان خروجی خود می‌رسد. اگر چه به نظر می‌رسد مقدار بهینه طراحی در نقطه ماکزیمم نمودارهای فوق رخ می‌دهد ولی نزدیک بودن آن به ناحیه افت‌های ناشی از غلظت برای پیل به شدت خطرناک است. همان‌طور که در شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود با افزایش فشار کاری پیل عملکرد آن بهتر شده و افت ولتاژ غلظتی در چگال‌های جریان بالاتر تاثیر خود را نشان می‌دهد. نکته بسیار مهمی که باید در طراحی پیل منظور گردد این است که چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افت‌های ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید نماید.



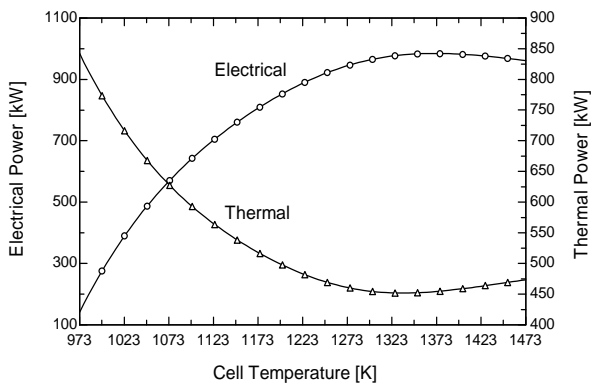
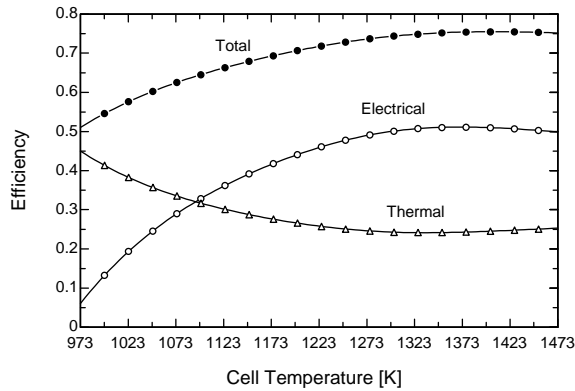
شکل ۶- تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در دمای عملکردی ۱۲۰۰ کلوین



شکل ۵- تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در فشار عملکردی ۱ بار

جهت تحلیل عملکرد سیستم تولید همزمان پیشنهادی، در شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات توان‌های الکتریکی و حرارتی تولید شده به همراه راندمان‌های الکتریکی، حرارتی و کل سیستم در فشار و دماهای مختلف عملکردی پیل به دست آورده شده است. همان‌طور که در تحلیل روابط مربوط به فرایند الکتروشیمیایی پیل بیان شد، دمای عملکردی پیل یکی از عوامل موثر در تغییر عملکرد آن می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود، با افزایش دمای عملکردی پیل، توان الکتریکی تولیدی در این سیستم تا حد معینی افزایش پیدا می‌کند. افزایش توان الکتریکی باعث کاهش حرارت تولیدی در پیل خواهد شد که این به نوبه خود باعث کاهش حرارت تولید شده در بازیاب سوم خواهد گردید. عامل اصلی کاهش توان الکتریکی و افزایش توان حرارتی در دماهای بالا افت ولتاژ غلظتی می‌باشد. شکل (۷) نشان می‌دهد که با توجه به نیازهای الکتریکی و حرارتی یک ساختمان می‌توان محدوده کارکرد دمایی پیل را مشخص کرد. به طور مثال اگر نیاز یک واحد ساختمانی بار الکتریکی بالا و بار حرارتی پایین باشد، دمای کاری پیل بالا در نظر گرفته خواهد شد و در صورتی که عکس این حالت مد نظر باشد استفاده از پیل‌های سوختی اکسید جامد با دمای کاری پایین توسعه می‌شود. در شکل (۸) راندمان کلی، الکتریکی و حرارتی سیستم پیشنهادی در محدوده دماهای مختلفی از عملکرد پیل نشان داده شده است. با افزایش دمای کاری پیل راندمان الکتریکی و کلی سیستم افزایش و راندمان حرارتی آن کاهش خواهد یافت. این افزایش و کاهش راندمان‌ها تا یک حد معین دمایی بوده و سپس در ادامه با بیشتر شدن دما جهت عکس را طی خواهند کرد که دلیل این امر را می‌توان ناشی از تاثیر منفی افت ولتاژ غلظتی بر روی عملکرد پیل سوختی دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای کاری پیل تا ۱۴۰۰ کلوین، راندمان کلی آن تا حدود ۷۵/۵ درصد افزایش خواهد یافت.

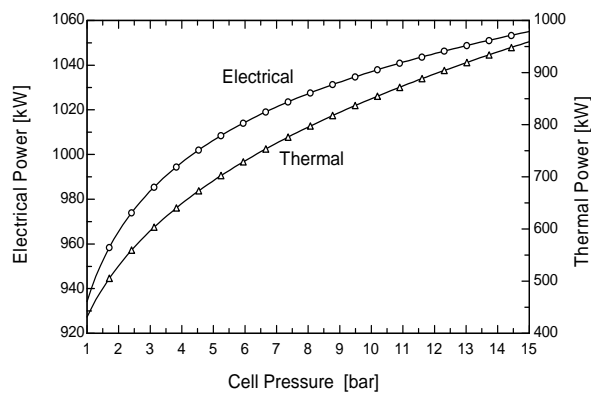
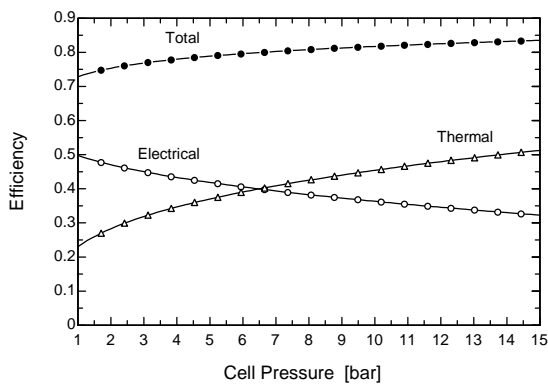




**شکل ۸-** تغییرات بازده الکتریکی، حرارتی و کل سیستم پیشنهادی نسبت به دمای عملکردی پیل در فشار کاری ۱/۲۵ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر متر مربع

**شکل ۷-** تغییرات توان الکتریکی و حرارتی سیستم پیشنهادی نسبت به دمای عملکردی پیل در فشار کاری ۱/۲۵ بار و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر متر مربع

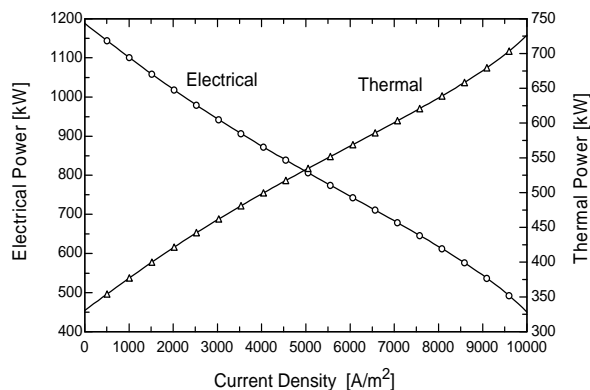
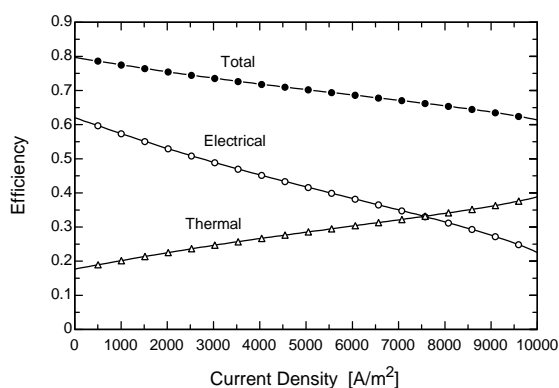
در شکل (۹) تاثیر فشار کاری پیل بر روی توان الکتریکی و حرارتی تولید شده در سیستم پیشنهادی نشان داده شده است. نتایج نشانگر افزایش هر دو توان تولیدی بر اثر افزایش فشار کاری پیل می‌باشد. مساله مهمی که باید در این حالت به آن توجه کرد، استفاده از کمپرسورهای هوا و سوخت قوی‌تر در نسبت فشارهای بالا می‌باشد، که این مساله به نوبه خود باعث کاهش راندمان الکتریکی سیستم خواهد گردید. در شکل (۱۰) تغییرات راندمان کلی، الکتریکی و حرارتی سیستم نسبت به فشار کاری پیل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش فشار کاری پیل باعث کاهش راندمان الکتریکی و افزایش راندمان حرارتی و کل سیستم خواهد شد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، فشار کاری سیستم در مقایسه با دمای کاری آن تاثیر کمتری بر روی افت ولتاژ غلظتی دارد و این مساله به نوبه خود باعث خواهد شد که این پارامتر تاثیر کمتری در تغییرات توان‌های الکتریکی و حرارتی خروجی از سیستم داشته باشد. طبق نتایج حاصله، در نسبت فشارهای بالا ماکزیمم راندمان کلی سیستم در حدود ۸۳/۵ درصد برآورد شده است. مشابه حالت قبل مساله نیاز حرارتی و الکتریکی ساختمان می‌تواند در تعیین نسبت فشار آن پارامتر موثری باشد.



**شکل ۹-** تغییرات بازده الکتریکی، حرارتی و کل سیستم پیشنهادی نسبت به فشار عملکردی پیل در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر متر مربع

**شکل ۱۰-** تغییرات توان الکتریکی و حرارتی سیستم پیشنهادی نسبت به فشار عملکردی پیل در دمای کاری ۱۲۷۳ کلوین و چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر متر مربع

شکل (۱۱) اثرات تغییرات چگالی جریان پیل بر روی توان الکتریکی و حرارتی تولید شده در سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش چگالی جریان در پیل از یک طرف سبب کاهش توان الکتریکی تولید شده در سیستم خواهد شد و از سوی دیگر توان حرارتی تولیدی در آن را افزایش خواهد داد. به طور کلی افزایش چگالی جریان به دلیل اثرات افت ولتاژ غلظتی سبب کاهش ولتاژ پیل در چگالی‌های بالا شده و این به نوبه خود باعث کاهش توان الکتریکی تولیدی در پیل خواهد گردید. از سوی دیگر افزایش چگالی جریان سبب افزایش حرارت تولیدی در پیل خواهد شد که این به نوبه خود باعث افزایش دمای محصولات خروجی از پیل شده و در ادامه سبب افزایش حرارت به‌دست آمده در بازیاب سوم خواهد شد. در شکل (۱۲) اثرات این پارامتر بر روی راندمان الکتریکی، حرارتی و کل سیستم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی جریان راندمان الکتریکی و کل سیستم کاهش پیدا کرده و راندمان حرارتی آن نیز افزایش خواهد یافت.

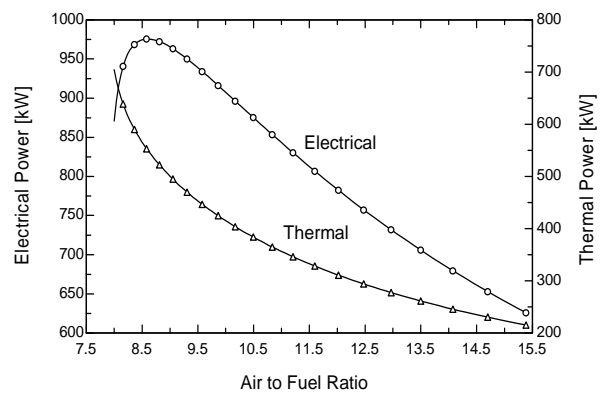
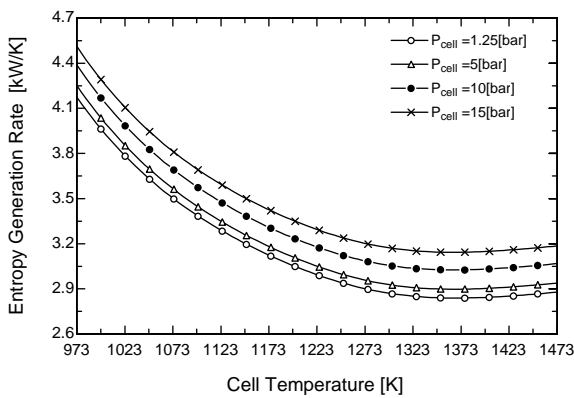


**شکل ۱۱-** تغییرات توان الکتریکی و حرارتی سیستم پیشنهادی نسبت به چگالی جریان پیل در دمای عملکردی ۱۲۷۳ کلوین و فشار کاری ۱/۲۵ بار

**شکل ۱۲-** تغییرات بازده الکتریکی، حرارتی و کل سیستم پیشنهادی نسبت به چگالی جریان پیل در دمای عملکردی ۱۲۷۳ کلوین و فشار کاری ۱/۲۵ بار

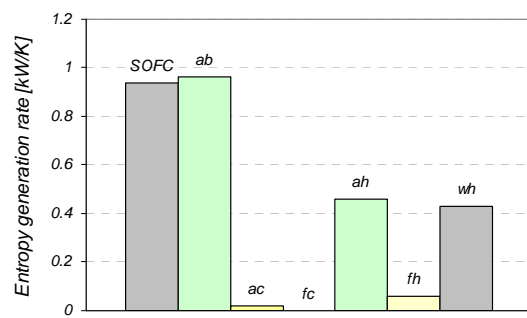
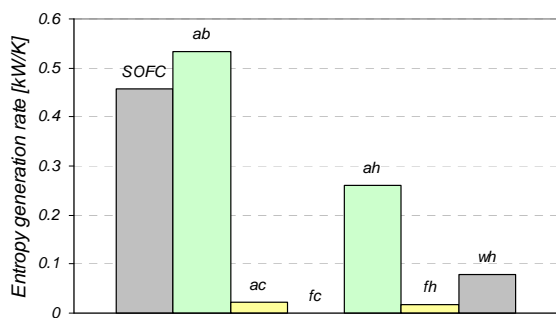
افزایش دبی سوخت ورودی به همراه ثابت ماندن ضریب مصرف سوخت، به این معنی می‌باشد که انرژی شیمیایی بیشتری در پیل در حال تبدیل به انرژی الکتریکی می‌باشد. در این حالت سوخت بیشتر و در نتیجه هوای بیشتری در پیل مصرف خواهد شد. از سوی دیگر افزایش دبی سوخت افزایش جریان تولیدی در پیل را به همراه خواهد داشت. افزایش جریان باعث بیشتر شدن اضافه ولتاژ پیل شده و تولید گرمای بیشتری را در آن سبب می‌شود که نتیجه آن افزایش دمای پیل می‌باشد. به طور کلی افزایش دبی سوخت اثر مطلوبی بر عملکرد سیستم ندارد و بازگشت ناپذیری‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. اثر مثبت این پارامتر در افزایش توان سیستم است، در حالی که کاهش راندمان را در پی خواهد داشت. مقدار این پارامتر بهتر است در یک مقدار مناسب تثبیت شود. از سوی دیگر افزایش بیش از جریان هوای ورودی به پیل نیز باعث افزایش توان تولیدی در پیل خواهد شد که در نتیجه این امر منجر به کاهش حرارت تولید شده در پیل و در نتیجه کاهش توان حرارتی مورد نیاز در بازیاب سوم خواهد شد. با توجه به موارد فوق باید برای نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم، یک مقدار بهینه به‌دست آورد. در شکل (۱۳) تغییرات توان الکتریکی و حرارتی خروجی از سیستم نسبت به تغییرات این پارامتر اشاره شده، آورده شده است. همان‌طور که در این شکل

مشاهده می شود با افزایش نسبت هوا به سوخت توان الکتریکی تولیدی در پیل بیشتر شده و سپس در ادامه سیر نزولی پیدا می کند. انتخاب نسبت هوا به سوخت بیشتر باعث کاهش چشمگیر توان الکتریکی و حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. در شکل (۱۴) نرخ تغییرات آنتروپی تولید شده در سیستم پیشنهادی تحت شرایط مختلف کاری آن نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود افزایش دمای کاری پیل باعث کاهش نرخ تولید آنتروپی در سیستم مورد نظر گردیده که این پارامتر در دماهای بالاتر نرخ ثابتی به خود می گیرد. برخلاف افزایش دما، افزایش فشار کاری سیستم باعث ازدیاد نرخ تولید آنتروپی در سیستم خواهد شد، که از نظر مهندسی مطلوب نمی باشد.



**شکل ۱۳-** تغییرات توان الکتریکی و حرارتی سیستم **شکل ۱۴-** تغییرات آنتروپی تولید شده در سیستم پیشنهادی در نسبتهای هوا به سوخت مختلف در دمای عملکردی ۱۲۷۳ کلین و فشار کاری ۱/۲۵ بار

در شکل های (۱۵) و (۱۶) توزیع نرخ تولید آنتروپی در اجزاء مختلف سیستم پیشنهادی در دو نسبت هوا به سوخت مختلف آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین نرخ تولید آنتروپی مربوط به محفظه پس سوز و پیل سوختی اکسید جامد بوده و کمترین مقدار نیز متعلق به کمپرسور و بازیاب سوخت می باشد. همان طور که مشاهده می شود افزایش نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم سبب کاهش نرخ آنتروپی تولیدی در اجزاء سیستم خواهد گردید.



**شکل ۱۵-** توزیع نرخ تولید آنتروپی در اجزاء مختلف سیستم پیشنهادی در نسبت هوا به سوخت ۹/۴ **شکل ۱۶-** توزیع نرخ تولید آنتروپی در اجزاء مختلف سیستم پیشنهادی در نسبت هوا به سوخت ۱۸/۸

در بخش پایانی نیز سیستم پیشنهادی از دیدگاه اقتصادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته نتایج آن با یک سیکل تولید همزمان میکرو توربین گازی مقایسه شده است. همان طور که در بخش پنجم اشاره شد هدف تحلیل اقتصادی تعیین قیمت تجهیزات سیستم پیشنهادی و همچنین محاسبه هزینه تولید الکتریسیته تولیدی در طول عمر اقتصادی سیستم (۲۰ سال) می باشد. نتایج جدول (۳) نشان می دهد که سیستم پیشنهادی در ظرفیت پایین از لحاظ قیمت خرید تجهیزات پایین می باشد ولی با در نظر گرفتن میزان برق تولیدی ارزش کمتری دارد. افزایش ظرفیت سیستم سبب می شود که قیمت برق تولیدی بر اساس قیمت تجهیزات و همچنین قیمت برق تولیدی بر اساس عمر اقتصادی سیستم کاهش پیدا کند که این مساله یک پارامتر سودمند در انتخاب یک سیستم می باشد. با توجه به نتایج ارائه شده می توان اینگونه بیان کرد که استفاده از سیستم تولید همزمان با پیل سوختی برای واحدهای مسکونی کوچک صرفه اقتصادی ندارد، ولی می توان از آن در مجتمع های مسکونی و یا شهرک های کوچک استفاده کرد.

جدول ۳- مقایسه حالات کارکرد مختلف سیستم از دیدگاه اقتصادی

پارامتر	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶
دبی هوا (کیلومول بر ساعت)	۳۰	۴۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
دبی سوخت (کیلومول بر ساعت)	۳/۱۹	۴/۲۵	۵/۳۱	۱۰/۶۳	۱۵/۹۵	۲۱/۲۶
دمای پیل (سلسیوس)	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳	۱۲۷۳
فشار کاری پیل (بار)	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵
تعداد سل (عدد)	۱۷۲۵	۲۲۹۸	۲۸۷۲	۵۷۴۹	۸۶۲۶	۱۱۴۹۸
توان الکتریکی تولیدی سیستم (کیلووات)	۲۸۳/۴	۳۷۷/۷	۴۷۱/۹	۹۴۴/۴	۱۴۱۷	۱۸۸۹
توان حرارتی تولیدی سیستم (کیلووات)	۲۰۴/۹	۲۷۳	۳۴۱/۲	۶۸۲/۹	۱۰۲۵	۱۳۶۶
قیمت سیستم (دلار)	۴۵۶۰۳۱	۶۰۰۲۷۳	۷۴۳۵۲۰	۱۴۵۴۰۰۰	۲۱۵۸۰۰۰	۲۸۵۶۰۰۰
قیمت برق تولیدی بر اساس قیمت تجهیزات (دلار بر کیلووات)	۱۶۰۹	۱۵۸۹	۱۵۷۵	۱۵۳۹	۱۵۲۲	۱۵۱۱
قیمت برق تولیدی بر اساس عمر اقتصادی سیستم (سنت بر کیلووات ساعت)	۵۷/۵۶	۴۳/۶۰	۳۵/۳۰	۱۸/۶۰	۱۳/۰۶	۱۰/۲۸

در جدول (۴) نیز سیستم تولید همزمان پیشنهادی با یک سیستم تولید همزمان میکروتوربین گازی مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود در یک ظرفیت ثابت در تولید برق، سیستم پیل سوختی از لحاظ قیمت برق تولیدی بر اساس قیمت تجهیزات گران تر از سیستم میکروتوربین می باشد ولی با در نظر گرفتن عمر اقتصادی سیستم قیمت برق تولیدی آن کمتر می باشد.

**جدول ۴- مقایسه حالت کارکرد سیستم پیشنهادی با یک سیکل توربین گازی**

سیستم	توان الکتریکی تولیدی سیستم (کیلووات)	قیمت برق تولیدی بر اساس قیمت تجهیزات (دلار بر کیلووات)	قیمت برق تولیدی بر اساس عمر اقتصادی سیستم (سنت بر کیلووات ساعت)
سیستم تولید همزمان با استفاده از میکروتوربین گازی	۱۸۸۹	۴۹۲	۱۲
سیستم تولید همزمان با استفاده از پیل سوختی	۱۸۸۹	۱۵۱۱	۱۰/۲۸

### نتیجه گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله می توان موارد زیر را به عنوان جمع بندی بحث ارائه نمود:

- افزایش دمای کاری پیل (تا دمای تقریباً ۱۳۴۰ کلوین) باعث افزایش توان الکتریکی و کاهش توان حرارتی سیستم تولید همزمان می گردد. همچنین افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش راندمان کلی و الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی سیستم تولید همزمان می گردد.
- چگالی شدت جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی باید در ناحیه افت های ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد، تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید نماید.
- با توجه به نیازهای الکتریکی و حرارتی یک ساختمان می توان محدوده کارکرد دمایی پیل را مشخص کرد. اگر نیاز یک واحد ساختمانی بار الکتریکی بالا و بار حرارتی پایین باشد، باید دمای کاری پیل بالا در نظر گرفته شود و در صورتی که عکس این حالت مد نظر باشد استفاده از پیل های سوختی اکسید جامد با دمای کاری پایین توسعه می شود.
- افزایش فشار کاری پیل باعث کاهش راندمان الکتریکی و افزایش راندمان حرارتی و کلی سیستم خواهد شد.
- با افزایش چگالی جریان راندمان الکتریکی و کلی سیستم کاهش پیدا کرده و راندمان حرارتی آن نیز افزایش خواهد یافت.
- جهت دستیابی به یک راندمان بالا در سیستم تولید همزمان پیشنهادی باید نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم یک مقدار مناسب انتخاب شود. برای سیستم پیشنهادی در این مقاله و با در نظر گرفتن حداکثر راندمان آن، مقدار نسبت هوا به سوخت برابر ۹/۴ پیشنهاد می شود.
- افزایش دما و کاهش فشار پیل باعث کاهش نرخ تولید آنتروپی در سیستم خواهد شد. بنابراین استفاده از دماهای کاری بالا و فشار کمتر باعث دستیابی به یک سیستم بهینه خواهد شد.

- بیشترین نرخ تولید آنتروپی در سیستم تولید همزمان پیشنهادی در محفظه پس‌سوز و پیل‌سوختی می‌باشد.
- استفاده از این سیستم تولید همزمان با پیل‌سوختی برای واحدهای مسکونی کوچک صرفه اقتصادی ندارد، ولی می‌توان از آن در مجتمع‌های مسکونی و یا شهرک‌های کوچک استفاده کرد.
- در یک ظرفیت ثابت سیستم تولید همزمان با پیل‌سوختی نسبت به سیستم میکروتوربین گازی دارای قیمت بالایی می‌باشد ولی با در نظر گرفتن قیمت برق تولیدی بر اساس عمر اقتصادی سیستم مناسب‌تر می‌باشد.

## سیاسگزاری

از حمایت‌های مالی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در انجام این تحقیق تشکر می‌شود.

## مراجع

- [1] Hawkes, A.D., and Leach, M.A., "Cost-effective Operating Strategy for Residential Micro-combined Heat and Power", *Journal of Energy*, Vol. 32, pp. 711-723, (2007).
- [2] Williams, M.C., "*Fuel Cell Handbook, U.S Department of Energy*", Virginia, (2002).
- [3] Hawkes, A.D., and Aguiar, P., "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*, Vol. 164, pp. 260-271, (2007).
- [4] Akkaya, A.V., Sahin, B., and Erdem, H.H., "Exergetic Performance Coefficient Analysis of a Simple Fuel Cell System", *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 4600-4609, (2007).
- [5] Akkaya, A.V, Sahin, B., and Erdem, H.H., "An Analysis of SOFC/GT CHP System Based on Exergetic Performance Criteria", *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 2566-2577, (2008).
- [6] Zink, F., Lu, Y., and Schaefer, L., "A Solid Oxide Fuel Cell System for Buildings", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 809-818, (2007).
- [7] Farhad, S., Hamdullahpur, F., and Yoo, Y., "Performance Evaluation of Different Configurations of Biogas-fuelled SOFC Micro-CHP Systems for Residential Applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 3758-3768, (2010).
- [8] Liu, Z., Li, X., and Liu, Z., "Thermodynamic Modelling and Analysis of the Ratio of Heat to Power Based on a Conceptual CHP System", *HVAC Technologies for Energy Efficiency*, Vol. IV-6-1, China, ICEBO2006, (2006).
- [9] Braun, R.J., Klein, S.A., and Reindl, D.T., "Evaluation of System Configurations for Solid Oxide Fuel Cell-based Micro-combined Heat and Power Generators in Residential Applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp. 1290-1305, (2006).

- [10] Fontell, E., Kivisaari, T., Christiansen, N., Hansen, J.B., and Pålsson, J., "Conceptual Study of a 250kW Planar SOFC System for CHP Application", *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 49-56, (2004).
- [11] Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., and Ottaviano, A., "An Energetic-exergetic Comparison between PEMFC and SOFC-based Micro-CHP Systems", *Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 3206-3214, (2011).
- [12] Pirkandi, J., Ghassemi, M., Hamed, M.H., and Mohammadi, R., "Electrochemical and Thermodynamic Modeling of a CHP System using Tubular Solid Oxide Fuel Cell (SOFC-CHP)", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 29-30, pp. 151-162, (2012).
- [13] Chan, S.H., Khor, K.A. and Xia, Z.T., "A Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness", *Journal of Power Sources*, Vol. 93, pp. 130-140, (2001).
- [14] Chan, S.H., Ho, H.K., and Tian, Y., "Modeling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant", *Journal of Power Sources*, Vol. 109, pp. 111-120, (2002).
- [15] Volkan Akkaya, A., "Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC", *International Journal of Energy Research*, Vol. 31, pp.79-98, (2007).
- [16] Ghannadan, M., Ghassemi, M., and Mollayi Barzi, Y., "Performance Analysis of a Tubular Sofc using a Simple and Efficient Thermal and Electrochemical Model", 18th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2010, 11-13 May, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, (2009).
- [17] Bo, C., Yuan, C., Zhao, X., Wu, C., and Qing Li, M., "Parametric Analysis of Solid Oxide Fuel Cell", *Clean Techn Environ Policy*, Springer-verlag, (2009).
- [18] Haseli, Y., Dincer, I., and Naterer, G.F., "Thermodynamic Analysis of a Combined Gas Turbine Power System with a Solid Oxide Fuel Cell Through Exergy", *Journal of Thermochemica Acta*, Vol. 480, pp. 1-9, (2008).
- [19] See at [www.nt.ntnu.no/users//magnehi/cepci\\_2011\\_py.pdf](http://www.nt.ntnu.no/users//magnehi/cepci_2011_py.pdf).
- [20] Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M., "*Thermal Design and Optimization*", John Wiley & Sons INC, New York, (1996).
- [21] Cheddie, D.F., "Thermo-economic Optimization of an Indirectly Coupled Solid Oxide Fuel Cell/gas Turbine Hybrid Power Plant", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 1702-1709, (2011).
- [22] Singhal, S.C., "Advances in Solid Oxide Fuel Cells", *Journal of Solid State Ionic*, Vol. 135, pp. 305-313, (2000).
- [23] Ciesar, J. A., "Hybrid Systems Development by the Siemens Westinghouse Power Corporation", Presented by Siemens Westinghouse Power Corporation, Natural Gas/Renewable Energy Hybrids Workshop, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, August, (2001).

## فهرست نمادهای انگلیسی

- A: مساحت  
 F: ثابت فارادی  
 h: آنتالپی  
 i: چگالی جریان  
 I: جریان  
 k: نسبت گرمای ویژه هوا  
 K: ثابت تعادلی  
 PEC: قیمت خرید به واحد دلار  
 $r_p$ : نسبت فشار کمپرسور  
 $R_u$ : ثابت عمومی گازها  
 S: آنتروپی  
 T: دمای توده پیل  
 $V_{act}$ : افت ولتاژ ناحیه فعالسازی  
 $V_{ohm}$ : افت ولتاژ ناحیه اهمی  
 $V_{conc}$ : افت ولتاژ ناحیه غلظت  
 $V_c$ : افت ولتاژ واقعی  
 W: کار  
 X: نرخ مولی پیشرفت واکنش ریغورمینگ  
 Y: نرخ مولی پیشرفت واکنش دگرگونی  
 Z: نرخ مولی پیشرفت واکنش کلی پیل

## نمادهای یونانی

- $\eta$ : راندمان  
 $\epsilon$ : ضریب کارایی

## زیرنویس

- AC: جریان متناوب  
 an: آند  
 ah: بازیاب هوا  
 ca: کمپرسور هوا  
 ca: کاتد  
 cell: پیل



cf: کمپرسور سوخت

DC: جریان مستقیم

fh: بازیاب سوخت

loss: تلفات

P: پمپ

surr: محیط

tot: کل

wh: بازیاب آب

**Abstract**

In this article, first, a CHP system based on the solid oxide fuel cell (SOFC) has been introduced and then, the influences of several effective parameters such as temperature, pressure, current density in the cell, and the rate of air-to-fuel ratio in the system on its performance have been investigated. For the purpose of studying the system, electrochemical and thermodynamic models have been presented in the cell and then, power and voltage diagrams under different working conditions, have been obtained. of the significant achievements of this research is the determination of optimum air-to-fuel ratio, and also the optimum fuel utilization coefficient in the proposed CHP system. The final results indicate an overall system efficiency of about 70-75% for the investigated SOFC-CHP system. By studying the operation of this system, it can be concluded that, the selection of system operating conditions is made on the basis of thermal and electrical needs of a building.