

## بررسی عملکرد سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد- توربین انبساطی برای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز

حسین عابد

ابراهیم افشاری\*

حمید بهشتی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

### چکیده

در این مقاله، استفاده از سیستم توربین انبساطی- پیل سوختی اکسید جامد در ایستگاه تقلیل فشار گاز به جای سیستم‌های متداول در ایران (استفاده از رگلاتور برای کاهش فشار)، پیشنهاد شده است و به بررسی عوامل موثر بر عملکرد سیستم هیبریدی پیشنهادی پرداخته می‌شود. کاهش فشار در ایستگاه‌های متداول توسط شیرهای فشارشکن انجام می‌گیرد که تولید انرژی ندارند؛ اما با اضافه شدن توربین‌های انبساطی و پیل‌های سوختی، می‌توان انرژی الکتریکی نیز تولید کرده و آن را به شبکه برق تزریق کرد. در زمستان به علت پایین بودن دمای گاز ورودی و همچنین بالا بودن فشار ورودی، در توربین انبساطی و شیرهای فشار شکن احتمال یخ‌زدگی و در نتیجه خرابی دستگاه‌ها خواهد بود. به این دلیل از یک بویلر برای تولید گرما استفاده می‌شود. چون پیل سوختی اکسید جامد گرمای زیادی در حین کار تولید می‌کند، می‌توان از این گرما برای پیش‌گرمایش استفاده کرد و میزان مصرف سوخت را پایین آورد. این کار به کمک تحلیل حرارتی و الکتروشیمیایی پیل سوختی همراه با تحلیل ترمودینامیکی دیگر اجزای سیستم هیبریدی انجام می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد ایستگاه تقلیل فشار با استفاده از ترکیب پیل سوختی و توربین، بازده ۵ تا ۱۰٪ بالاتری را نسبت به ایستگاه تقلیل فشار شامل پیل سوختی و شیر فشارشکن دارد. برای حالتی که سیستم دارای پیل سوختی است، میزان مصرف سوخت نسبت به حالتی که سیستم بدون وجود پیل سوختی کار می‌کند، بسیار زیاد است؛ زیرا بیشتر این سوخت صرف تولید توان الکتریکی می‌شود. همچنین استفاده از پیل سوختی در ایستگاه‌های تقلیل فشار باعث بالاتر رفتن بازده سیستم و در نتیجه کاهش مصرف سوخت نسبت به نیروگاه‌های چرخه ترکیبی است.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، توربین انبساطی، ایستگاه‌های تقلیل فشار، سیستم هیبریدی.

## Study of Fuel cell- Turboexpander Hybrid System for Gass Pressure Reducing Stations

H. Abed

E Afshari

H. Beheshti

Department of Mechanical Engineering, Esfahan University, Esfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering, Esfahan University, Esfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering, Esfahan University, Esfahan, Iran

### Abstract

In this research, it is tried to study fuel cell turbo-expander hybrid system for gas pressure reduction stations. This research is based on thermodynamic equations for the behavior of hybrid systems in various conditions. Gas pressure reducing stations reduce gas pressure from 5000 kPa to around 1000 kPa. This pressure reduction is performed by expansion a valve that does not produce any energy. Electricity can be produced and injected to the grid by adding a turbo-expander and fuel cell in a gas reducing station. In winter, due to low temperature and high pressure of inlet gas, gas freezing can causes damage in turbo-expander and expansion valve, for this reason a boiler is used in cold months to produce heat for increasing the inlet gas temperature. Since fuel cell can generate considerable heat during its operation, it can be used for preheating the inlet gas and lower the fuel consumption. The results show that pressure reduction station which consisted of a fuel cell and a turbine has 5 to 10% more efficiency than a pressure reducing station which consisted of a fuel cell and expansion valves; however the amount of fuel consumption is equal for both systems. For pressure reduction station with fuel cell, the fuel consumption is very higher than the pressure reduction station without fuel cell; because more fuel will be consumed for electricity. The results show that more efficiency can be obtained by using the fuel cell in pressure reducing station and thus fuel consumption will be more reduced compared with a combined cycle power plant.

**Keywords:** Fuel Cell, Turbo-Expander, Pressure Reducing Station, Hybrid System.

### ۱- مقدمه

نمی‌کند با محیط اطراف تبادل گرمایی داشته باشد؛ از این رو فرایند آدیاباتیک در نظر گرفته می‌شود. برای آن‌که بتوان تغییرات دما گاز را طی این فرآیند پیش‌بینی کرد؛ باید از اثر ژول - تامسون و ضریب آن استفاده کرد. این ضریب نشانگر تغییرات دمای گاز نسبت به فشار آن در فرآیند آدیاباتیک آنتالپی ثابت است. در محدوده‌ی کاری ایستگاه تقلیل فشار گاز ضریب ژول - تامسون مثبت است، یعنی با کاهش فشار دمای گاز کاهش می‌یابد. کاهش دما در طی عبور گاز از رگلاتور که موجب یخ‌زدگی و یا تشکیل هیدرات‌های گازی در تجهیزات می‌شود. به همین دلیل گاز پیش از رسیدن به رگلاتور توسط بویلرها و یا سایر

ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز برون شهری فشار گاز را از حدود ۱۰۰۰ به حدود ۲۵۰ پوند بر اینچ مربع کاهش می‌دهند. البته فشار ورودی و خروجی با توجه به شرایط عملیاتی می‌تواند متفاوت باشد. کاهش و کنترل فشار گاز، اصلی‌ترین هدف یک ایستگاه تقلیل فشار است که این کار توسط شیرهای کنترلی (رگلاتور) انجام می‌شود. طبیعی است که کاهش فشار با تغییر دیگر خواص گاز همراه است. مناسب‌ترین روش برای بررسی تغییر خواص گاز بررسی تغییرات دمای آن است. چون این فرآیند خیلی سریع اتفاق می‌افتد گاز فرصت

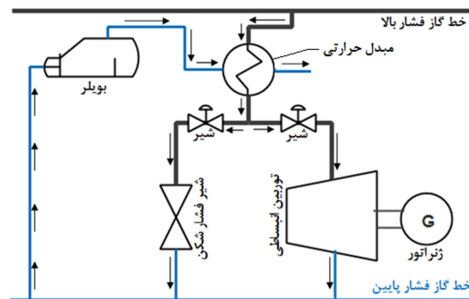
\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: e.afshari@eng.ui.ac.ir

انجام شده است. پوزیویل [۱] با شبیه‌سازی یک ایستگاه انتقال گاز نشان داد افت دما در شیر اختناق می‌تواند ۰/۴۵ تا ۰/۶ سلسیوس بر واحد افت فشار (بار) باشد؛ در حالی که با توربین انبساطی این مقدار بسیار بیشتر و بسته به ترکیب گاز مقدار ۱/۵ تا ۲ بر واحد بار است. این سرمایش می‌تواند اثرات مضره همچون تشکیل هیدرات و تشکیل مایع را در پی داشته باشد. او نشان داد با پیش گرم کردن گاز می‌توان این مشکل را برطرف کرد؛ به‌گونه‌ای که با پیش گرم کردن در ترکیب گاز ثابت و نرخ جریان ثابت ۶۰ مترمکعب بر ساعت، با تغییر فشار ورودی از ۴۵ تا ۶۳ بار و فشار خروجی از ۱۴ تا ۲۳ بار، دمای خروجی مقدار ثابت سه درجه سلسیوس باقی می‌ماند. در تحقیق رامی و همکاران [۲] ایستگاه تقلیل فشار گاز با شیر فشارشکن، برای مشخص شدن شرایط بهینه عملیاتی مدل شده است. در این تحقیق رفتار دینامیکی تنظیم فشار مدل و تغییرات فشار شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی مقایسه شده است. مطالعاتی نیز در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و به خصوص انرژی خورشیدی در ایستگاه تقلیل فشار گاز با یا بدون توربین انبساطی انجام شده است [۳-۵]. نتایج این مطالعات حاکی از امکان-پذیری اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبع پیش-گرمایش هوا می‌باشد. ذبیعی و تقی‌زاده [۶] به مطالعه امکان‌پذیری استفاده از انرژی بازگرمایش در یک ایستگاه فشار شهری با توربین انبساطی پرداختند. آنها چالش‌های استفاده از توربین انبساطی به جای شیر فشار شکن در ایستگاه را بررسی کردند. حسینی و همکاران [۷] به بررسی مدل عددی سوخت متان تک پیل اکسید جامد برای آنالیز تأثیرات ترکیبی پارامترهای ساختاری میکرو و ماکرو پرداختند. آنها نتایج حاصل از شبیه‌سازی خود را با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی کردند و به این نتیجه رسیدند که شبیه‌سازی سه بعدی نتایج بهتری با دقت بالاتر را نتیجه می‌دهد. آندرسون و همکاران [۸] به مدل کردن پیل اکسید جامد با در نظر گرفتن هیدروژن و مونواکسیدکربن به عنوان واکنش‌دهنده‌های الکتروشیمیایی پرداختند. آنها با استفاده از مدل‌سازی عددی و مشخصاً روش المان محدود به مدل‌سازی پیل اکسید جامد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که توزیع چگالی در طول جریان اصلی سیال به شرایط و دمای محلی بستگی دارد. پردازش سوخت به منظور تولید هیدروژن در سیستم پیل سوختی بسیار مهم است. هدف مطالعه‌ی تپیان و ویچانوف [۹] در سال ۲۰۱۴ به کار بردن مفهوم ترمودینامیک برای تشخیص فرآیند ریفورمینگ مناسب برای سوخت اتانول در پیل سوختی اکسید جامد است. قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای توصیف مقدار انرژی مناسب مورد نیاز برای فرآیندهای بهسازی (ریفورمینگ). به کار گرفته شده‌اند. تأثیر پارامترهای کلیدی به کار برده شده روی توزیع محصولات ریفورمینگ مانند هیدروژن، کربن مونواکسید، کربن دی‌اکسید و متان و امکان آرایش کربن در ریفورمینگ اتانول به عنوان تابع نسبت بخار به اتانول، نسبت اکسیژن به اتانول و دما در فشار اتمسفر مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل‌های انرژی و انرژی برای تشخیص بهترین روش ریفورمینگ اتانول برای کاربردهای پیل سوختی اکسید جامد در تحقیق این دو مورد استفاده قرار گرفته است.

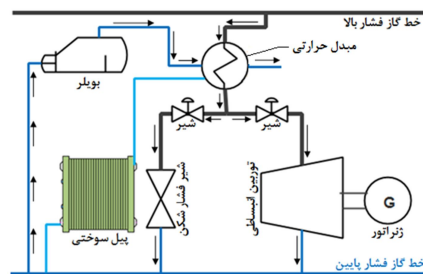
برای افزایش بازده کلی یک ایستگاه تقلیل فشار گاز، باید فرآیندی که در رگلاتور رخ می‌دهد (فرآیند اختناق) که یک فرآیند کاملاً برگشت‌پذیر است اصلاح گردد. یک روش برای اصلاح، استفاده از

روش‌ها مانند استفاده از پیل سوختی گرم می‌شود. اگر گاز فشار بالای گرم شده وارد رگلاتور شود فشارش کاهش می‌یابد، ولی از انرژی گاز هیچ استفاده‌ای نمی‌شود. اما اگر این گاز پر فشار وارد یک توربین انبساطی شود؛ انرژی آن تبدیل به کار الکتریکی می‌شود. همچنین اگر پیش گرمایش گاز توسط پیل سوختی انجام شود؛ برق تولیدی توسط پیل می‌تواند به برق تولیدی توسط توربین اضافه شود. علاوه بر تولید برق، راندمان بالا و عدم ایجاد آلاینده‌ی از دیگر مزایای استفاده از پیل سوختی به جای بویلر در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز می‌باشد.

طرحواره‌ای از سیستم‌های ایستگاه تقلیل فشار گاز با توربین انبساطی با بویلر (بدون پیل سوختی) در شکل ۱ و سیستم هیبریدی توربین انبساطی و پیل سوختی در شکل ۲ نشان داده شده است. گاز طبیعی فشار بالا توسط خط لوله اصلی به ایستگاه منتقل می‌شود. قبل از این که گاز منبسط شود از مبادله‌کن گرمایی عبور می‌کند تا دمای آن به دمای اطمینان خروجی افزایش یابد. در واقع سیال گرم در این مبدل از یک بویلر تامین می‌شود. گاز قبل از ورود به توربین انبساطی یا شیر فشار شکن یا ترکیب هردو، پیش گرم می‌شود و نرخ جریان تخصیص داده شده بستگی به محدودیت توربین انبساطی دارد. دما و فشار گاز عبوری از توربین انبساطی کاهش یافته و کار تولید می‌شود. در سیستم با پیل سوختی (شکل ۲) از گاز فشار پایین استفاده شده و این گاز به هیدروژن غنی شده برای استفاده در پیل تبدیل می‌شود.



شکل ۱- سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز با توربین انبساطی برای تولید برق بدون پیل سوختی



شکل ۲- سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد - توربین انبساطی

گرمای تولید شده توسط پیل در مبادله‌کن گرمایی صرف گرم کردن گاز فشار بالا می‌شود. سپس گاز با دما و فشار بالا قابل قبول از توربین انبساطی یا شیر فشارشکن عبور می‌کند و به شبکه توزیع فشار پایین هدایت می‌شود.

برخی مطالعات در زمینه خطوط انتقال گاز با شرایط جریان متنوع

شبهه‌سازی شده است. برگشت‌ناپذیری در این فرآیند شامل بازده آیزنتروپیک است. آنتالپی برای حالت‌های مختلف و همچنین آنتروپی و آنتالپی برای فرآیند ایده‌آل انبساط آیزنتروپیک به همراه بازه آیزنتروپیک برای محاسبه آنتالپی خروجی مورد نیاز است. قدرت خروجی توربین انبساطی با توجه به نرخ جریان، تغییرات آنتالپی و دمای خروجی که از آنتالپی خروجی و فشار به دست می‌آید، محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (4)$$

$$\dot{W} = \dot{m}_{Turbo} (h_1 - h_2) \quad (5)$$

$h_1$  و  $h_2$  آنتالپی ورودی و خروجی توربین انبساطی،  $h_{2s}$  آنتالپی انبساط آیزنتروپیک خروجی،  $\eta$  بازده آیزنتروپیک،  $\dot{m}_{Turbo}$  نرخ جریان عبوری از توربین انبساطی،  $\dot{W}$  قدرت خروجی می‌باشد. کل برق تولیدی سیستم از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{electrical} = \dot{W} \eta_{gear\ box} \eta_{generator} P_{fuel\ cell} \quad (6)$$

$\dot{W}$  کار تولید شده در توربین انبساطی و  $\eta_{gear\ box}$  و  $\eta_{generator}$  بازده گیربکس و بازده ژنراتور و  $P_{fuel\ cell}$  برق تولیدی پیل سوختی می‌باشد.

## ۲-۲-۲- پیل سوختی اکسید جامد

با توجه به این که بیشتر سهم توان تولیدی در دستگاه‌های هیبریدی مربوط به پیل سوختی می‌باشد، روابط به کار رفته در پیل به‌طور کامل و در سه بخش مجزا ارائه شده است.

### ۲-۲-۱- محاسبات بهسازی (ریفورمینگ)

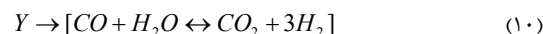
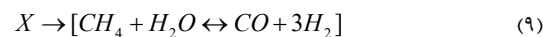
واکنش‌های صورت گرفته در ریفورمینگ داخلی به شدت گرماگیر می‌باشند که این ویژگی سبب رفع نیاز پیل به سیستم خنک کاری می‌شود. محاسبات ریفورمینگ تنها برای متان، اتان و پروپان که سه جزء اصلی گاز طبیعی را تشکیل می‌دهند صورت می‌گیرد؛ زیرا مقدار و تاثیر سایر اجزا گاز ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر می‌باشد. واکنش‌های شیفت (دگرگونی) و به‌سازی (ریفورمینگ) به صورت تعادلی بوده و سینتیک واکنش‌های شیمیایی در نظر گرفته نشده است. ثابت تعادل برای یک مخلوط گاز ایده‌آل تابعی از دما می‌باشد. ثابت‌های تعادل به‌کاررفته در محاسبات دگرگونی و ریفورمینگ از رابطه (۷) و (۸) به دست می‌آید [۹].

$$\log K_p = 5.473 \times 10^{-12} T^4 - 2.57479 \times 10^{-8} T^3 + 4.63742 \times 10^{-5} T^2 - 3.915 \times 10^{-2} T + 1.32097 \times 10^1 \quad (7)$$

$$\log K_p = -2.63121 \times 10^{-11} T^4 + 1.24065 \times 10^{-7} T^3 - 2.5232 \times 10^{-4} T^2 + 1.95028 \times 10^{-1} T - 6.61395 \times 10^1 \quad (8)$$

### ۲-۲-۲- بهسازی و دگرگونی متان

تنها هیدروکربن سبک موجود در گاز طبیعی، متان می‌باشد. در این مقاله خواص گاز طبیعی به صورت خواص متان در نظر گرفته شده است و واکنش‌های ریفورمینگ آن به صورت زیر است [۹].



توربین انبساطی و نیز ترکیب توربین انبساطی و پیل سوختی است. در این مقاله، برای اولین بار در ایستگاه تقلیل فشار گاز به جای سیستم‌های متداول در ایران (استفاده از رگلاتور برای کاهش فشار)، استفاده از سیستم توربین انبساطی- پیل سوختی اکسید جامد پیشنهاد شده است. در ادامه، به منظور بررسی تاثیر نوسان جریان گاز در فصل‌های سال، به مطالعه عوامل موثر بر عملکرد و سیستم هیبریدی توربین انبساطی - پیل سوختی اکسید جامد در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز (ایستگاه شهرکرد) پرداخته شده است. بررسی قدرت خروجی، سوخت مورد نیاز و بازده سیستم تحت تغییرات جریان گاز و مقایسه سه سیستم شامل موارد زیر از اهداف اصلی این مقاله می‌باشد.

۱) ایستگاه تقلیل فشار گاز با رگلاتور،

۲) ایستگاه تقلیل فشار گاز با توربین انبساطی و بویلر و

۳) ایستگاه تقلیل فشار گاز با توربین و پیل سوختی

## ۲- معادلات حاکم

### ۲-۱- سیستم

سیستم بررسی شده در این مقاله مطابق شکل ۲ می‌باشد. گاز فشار بالا پس از گرم شدن در یک مبادله‌کن گرما وارد توربین انبساطی یا رگلاتور می‌گردد. گرمای مورد نیاز در مبادله‌کن گرما از طریق پیل سوختی اکسید جامد و یا بویلر تامین می‌گردد. در پیل سوختی با تامین سوخت از خط کم فشار علاوه بر گرمایش گاز خروجی برق نیز تولید می‌شود. کاهش فشار گاز در شیر فشار شکن یک فرآیند آنتالپی ثابت است. با مشخص کردن دما و فشار، آنتالپی مشخص می‌شود. همچنین با مشخص کردن آنتالپی یا فشار، دمای سیستم مشخص می‌شود. در این شبهه‌سازی، دما و فشار ورودی و خروجی به شیر فشارشکن، به مقادیر آنتالپی مرتبط شده و آنتالپی‌های خروجی و ورودی یکسان در نظر گرفته شده است.

$$h_1 = h_{2valve} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $h_1$  آنتالپی گاز پیش گرم شده ورودی در دمای  $T_1$  و فشار ورودی  $P_1$ ،  $h_{2valve}$  آنتالپی خروجی در دمای خروجی  $T_{2valve}$  و فشار خروجی  $P_2$  می‌باشد. دمای مطلوب خروجی شیر فشار شکن یا توربین انبساطی دمای ورودی به پیل سوختی و بویلر را مشخص می‌کند و با توجه به این دما، مقدار گرمای مورد نیاز و مقدار سوخت بویلر مشخص می‌شود. مقدار گرمای موردنیاز برای پیش گرم کردن مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_i) \quad (2)$$

$h_i$  آنتالپی ورودی به سیستم بر حسب  $T_i$ ،  $kJ/kg$  دمای ورودی به سیستم،  $\dot{m}$  مقدار دبی ورودی به سیستم بر حسب  $kg/s$  و  $\dot{Q}$  حرارت مورد نیاز سیستم بر حسب  $kW$  است. مقدار سوخت مورد نیاز بویلر به میزان حرارت مورد نیاز و بازده بویلر و ظرفیت گرمایی سوخت دارد که از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m}_{Boiler\ Fuel} = \frac{\dot{Q}}{HHV \times \eta_B} \quad (3)$$

$\dot{m}_{Boiler\ Fuel}$  دبی سوخت بویلر،  $HHV$  ظرفیت گرمایی گاز طبیعی و  $\eta_B$  بازده بویلر می‌باشد.

فرآیند توربین انبساطی به صورت آدیاباتیک همراه با کار خروجی

در رابطه (۲۳)،  $E^0$  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 است. جهت محاسبه ولتاژ واقعی پیل باید افت‌های مربوط به پیل (اضافه ولتاژ پیل) که شامل افت ولتاژ ناحیه فعال‌سازی ( $V_{act}$ ) افت ولتاژ ناحیه اهمیک ( $V_{ohm}$ ) و افت ولتاژ ناحیه غلظت ( $V_{conc}$ ) می‌باشند، محاسبه شده و در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن ( $V_{cell}$ ) به دست آید [۱۰، ۱۲، ۱۳].

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) = E - \Delta V_{loss} \quad (24)$$

افت مربوط به فعال‌سازی شامل افت‌های مربوط به راه‌اندازی پیل و همچنین غلبه بر واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد. مقدار این افت برابر مجموع اضافه ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد پیل بوده و با ساده‌سازی رابطه باتلر - ولمر طبق روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۳].

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (25)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_0} \right) \quad (26)$$

در رابطه، (۲۶)،  $i_0$  و  $i$  به ترتیب برابر چگالی جریان و چگالی جریان تبدیلی می‌باشند. مقدار چگالی جریان تبدیلی برای آند و کاتد در یک پیل سوختی اکسید جامد از دو رابطه نیمه تجربی زیر به دست می‌آیند [۱۳].

$$i_{0,an} = \gamma_{an} \left( \frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left( -\frac{E_{act,an}}{R_u T} \right) \quad (27)$$

$$i_{0,ca} = \gamma_{ca} \left( \frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right) \exp \left( -\frac{E_{act,ca}}{R_u T} \right) \quad (28)$$

در روابط بالا  $\gamma$  پارامتری است که مقدار آن به جنس الکترواد آند و کاتد بستگی داشته (ضریب محاسبه چگالی جریان) و  $E_{act}$  مقدار انرژی فعال‌سازی می‌باشد. انرژی فعال‌سازی آند  $E_{act,an}$ ، انرژی فعال‌سازی کاتد  $E_{act,ca}$ ، ضرایب محاسبه چگالی جریان  $\gamma$  به ترتیب برابر  $110000$  کیلوژول بر کیلو مول،  $155000$  کیلو ژول بر کیلو مول و  $7 \times 10^9$  امپر بر متر مربع می‌باشد [۱۳].

مقاومت ناشی از حرکت الکترون‌ها در آند، کاتد و متصل کننده داخلی و حرکت یون‌ها در الکتروولیت سبب ایجاد افت ولتاژ اهمی می‌شود. بر اساس افت ولتاژ اهمی برای این چهار جز با استفاده از روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۳].

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (29)$$

$$V_{ohm} = i r \quad (30)$$

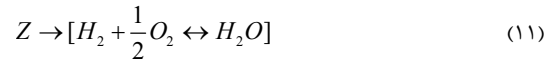
$$r_{an} = 0.0000298 \exp \left( \frac{1392}{T} \right) \times 0.0001 \quad (31)$$

$$r_{ca} = 0.0000811 \exp \left( \frac{600}{T} \right) \times 0.0022 \quad (32)$$

$$r_{el} = 0.0000294 \exp \left( \frac{10350}{T} \right) \times 0.0004 \quad (33)$$

$$r_{in} = 0.000085 \exp \left( \frac{4690}{T} \right) \times 0.0012 \quad (34)$$

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته شود، نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق نداشته و باعث افت ولتاژ شدید در پیل می‌شود. افت



روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب واکنش‌های ریفورمینگ و دگرگونی داخلی متان در پیل سوختی می‌باشند. طبق این دو واکنش در پیل سوختی، متان به هیدروژن تبدیل می‌شود و بر اساس رابطه (۱۱) در واکنش الکتروشیمیایی پیل شرکت می‌کند. در روابط بالا  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  نرخ مولی پیشرفت واکنش‌ها می‌باشند که با موازنه جرمی گازهای مختلف در تعادل طبق روابط زیر نرخ مولی گازهای تولید شده از واکنش متان بدست خواهد آمد.

$$[\dot{n}_{CH_4}]^{out} = [\dot{n}_{CH_4}]^{in} - X \quad (12)$$

$$[\dot{n}_{H_2O}]^{out} = [\dot{n}_{H_2O}]^{in} - X - Y + Z \quad (13)$$

$$[\dot{n}_{H_2}]^{out} = [\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3X + Y - Z \quad (14)$$

$$[\dot{n}_{CO}]^{out} = [\dot{n}_{CO}]^{in} + X - Y \quad (15)$$

$$[\dot{n}_{CO_2}]^{out} = [\dot{n}_{CO_2}]^{in} + Y \quad (16)$$

$$[\dot{n}_{tot}]^{out} = [\dot{n}_{tot}]^{in} + 2X \quad (17)$$

در روابط (۱۲) الی (۱۷)، مقدار ورودی مقادیر ورودی اولیه این اجزاء می‌باشد. با توجه به واکنش‌های پیل، ثابت تعادل برای دو واکنش ریفورمینگ و دگرگونی بر حسب فشار جزئی به صورت زیر است..

$$K_{p,r} = \frac{P_{H_2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (18)$$

$$K_{p,s} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (19)$$

با توجه به روابط (۱۲) الی (۱۹) و همچنین با توجه به واکنش‌های الکتروشیمیایی پیل، روابط زیر به دست می‌آید.

$$K_{p,r} = \frac{([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3X + Y - Z)^3 \times ([\dot{n}_{CO}]^{in} + X - Y)}{([\dot{n}_{CH_4}]^{in} - X) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - X - Y + Z)} \times \frac{P_{cell}^2}{([\dot{n}_{tot}]^{in} + 2X)^2} \quad (20)$$

$$K_{p,s} = \frac{([\dot{n}_{CO_2}]^{in} + Y) \times ([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3X + Y - Z)}{([\dot{n}_{CO}]^{in} + X - Y) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - X - Y + Z)} \quad (21)$$

$$Z = U_f \times (3X + Y) \quad (22)$$

$U_f$  ضریب مصرف سوخت می‌باشد که به صورت نسبت هیدروژن واکنش داده در آند به هیدروژن تولیدی در آن تعریف می‌شود. فاکتور مصرف سوخت مقدار مشخصی در نظر گرفته شده است (۰/۸۵). با توجه به سه رابطه (۲۰) الی (۲۲) و قرار دادن آنها در معادلات (۱۲) الی (۱۷) نرخ مولی گازهای تولید شده در پیل به دست می‌آید.

### ۲-۲-۳- محاسبات الکتروشیمیایی

حل کلی معادلات بقای جرم و انرژی پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولید شده در آن دارد. در اینجا، پیل سوختی به صورت صفر بعدی (ترمودینامیکی) تحلیل شده است و افت‌های مختلف اتفاق افتاده در پیل از روابط تجربی مشخص شده است. ولتاژ برگشت پذیر پیل توسط معادله نرنست و به شکل زیر تعریف می‌شود [۱۰ و ۱۱].

$$E = E^0 + \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (23)$$

محیط ( $\dot{Q}_{sur}$ ) وارد می شود.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{sur} \quad (49)$$

در حالت واقعی به هیچ عنوان نمی توان فرآیندهای انجام شده در پیل سوختی را آدیباتیک در نظر گرفت و همراه مقداری تلفات گرمایی به محیط وجود دارد. با در نظر گرفتن این مسئله در حالت ایده آل فرض می شود که پیل سوختی آدیباتیک داخلی بوده و گرمای خالص باقیمانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل خواهد شد ( $\dot{Q}'$ ). در این حالت با در نظر گرفتن دمای یکسان برای گازهای خروجی از آند و کاتد، رابطه (50) حاصل خواهد شد. در این رابطه  $\Delta h_{ca,in}$  و  $\Delta h_{an,in}$  مقدار تغییرات آنتالپی واکنش دهنده ها در آند و کاتد و  $\Delta h_{ca,out}$  و  $\Delta h_{an,out}$  مقدار تغییرات آنتالپی محصولات در آند و کاتد خواهند بود.

$$\dot{Q}'' = \Delta h_{ca,in} + \Delta h_{an,in} + \Delta h_{ca,out} + \Delta h_{an,out} \quad (50)$$

برای محاسبه دمای گازهای خروجی از پیل سوختی از یک الگوریتم تکرار استفاده شده و دقت آن نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده است [14-16].

$$\dot{Q}_{error} = \left| \frac{\dot{Q}'' - \dot{Q}'}{\dot{Q}'} \right| < 0.001 \quad (51)$$

برای محاسبه بازده کل سیستم از معادله (52) استفاده می شود [16].

$$\eta_{system} = \frac{P_{electrical}}{\dot{m}_{fuel} \times (HHV)} \quad (52)$$

ارزش  $\dot{m}_{fuel}$  نرخ مصرف سوخت توسط بویلر و پیل سوختی،  $HHV$  ارزش حرارتی گاز طبیعی و  $P_{electrical}$  برق تولیدی کل سیستم می باشد. مقادیر ثابت ورودی در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- مقادیر ثابت های ورودی

مقدار	نماد	متغیر
2240 (kPa)	$P_3$	فشار خروجی سیستم
3 (°C)	$T_3$	دمای خروجی سیستم
101.3 kPa	$P_{STD}$	فشار استاندارد
15 (°C)	$T_{STD}$	دمای استاندارد
42500 (kJ/kg)	HHV	ارزش حرارتی سوخت
0.92	$\eta_{Design}$	بازده طراحی توربین انبساطی
0.94	$\eta_{Boiler}$	بازده بویلر
0.90	$\eta_{Gearbox}$	بازده گیربکس
0.93	$\eta_{Generator}$	بازده ژنراتور

### ۳- نتایج

#### ۳-۱ اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی کد تهیه شده، لازم است برای یک نمونه معین نتایج این بخش حاصل از کد تهیه و با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود برای پیل سوختی، مطابق جدول ۲ مقایسه گردد. با توجه به کمبود نتایج در زمینه سیستم های هیبریدی، در این تحقیق سیستم معرفی شده توسط چان و همکاران [۱۰] مدل سازی شده و نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج تحقیقات آن ها مقایسه شده است. همچنین، نتایج در شرایط عملکردی دیگر (متناسب با اطلاعات موجود

مربوط به غلظت در چگالی جریان های بالا اهمیت پیدا می کند. مقدار این افت با استفاده از روابط زیر به دست خواهد آمد [۱۳].

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca} \quad (35)$$

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1 - i / i_{l,H_2}}{1 + i / i_{l,H_2O}} \right) \quad (36)$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1}{1 - i / i_{l,O_2}} \right) \quad (37)$$

در روابط بالا،  $i_l$  چگالی جریان حدی است. چگالی جریان حدی برای هیدروژن، آب و اکسیژن طبق روابط زیر حاصل خواهد شد [۱۳].

$$i_{l,H_2} = \frac{n_e F D_{eff,H_2}}{R_u T \delta_{an}} P_{H_2} \quad (38)$$

$$i_{l,H_2O} = \frac{n_e F D_{eff,H_2O}}{R_u T \delta_{an}} P_{H_2O} \quad (39)$$

$$i_{l,O_2} = \frac{n_e F D_{eff,O_2}}{R_u T \delta_{ca}} P_{O_2} \quad (40)$$

در روابط بالا  $\delta_{ca}$  و  $\delta_{an}$  به ترتیب ضخامت آند و کاتد و  $D_{eff}$  ضریب پخش مؤثر گاز می باشد.

پس از محاسبه افت ولتاژهای اشاره شده مقدار ولتاژ واقعی پیل طبق رابطه (24) و مقدار جریان هر پیل و توان کلی در انباره پیل نیز طبق روابط زیر مشخص خواهد شد.

$$I_{cell} = i A_{cell} \quad (41)$$

$$I_{tot} = 2Fz \quad (42)$$

$$Power_{dc-tot} = V_{cell} I_{tot} \quad (43)$$

$$Power_{ac-tot} = Power_{dc-tot} \times \eta_{inv,fc} \quad (44)$$

در رابطه (44)،  $\eta_{inv,fc}$  ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب است.

#### ۲-۲-۴- محاسبات حرارتی

برای محاسبه دمای گازهای خروجی از توده پیل باید سه منبع دمایی موجود که شامل گرمای تولید شده در واکنش های الکتروشیمیایی و دگرگونی و حرارت مصرف شده در واکنش ریفرورمینگ را در نظر گرفت. با توجه به این که واکنش ریفرورمینگ گرماگیر بوده و واکنش های دگرگونی و الکتروشیمیایی پیل گرمازا می باشند، لذا کل انتقال گرمای خالص پیل سوختی اکسید جامد از اختلاف مقادیر گرمایی سه واکنش فوق به دست خواهد آمد. مقدار گرمای حاصل از واکنش های ریفرورمینگ، دگرگونی و الکتروشیمیایی طبق روابط زیر به دست می آید [۱۰، ۱۲].

$$\dot{Q}_r = X(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (45)$$

$$\dot{Q}_{sh} = Y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (46)$$

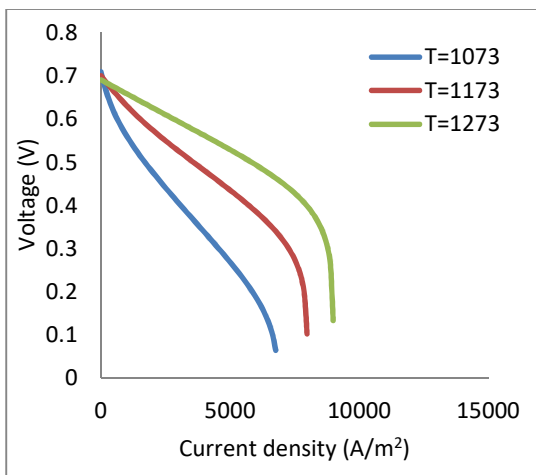
$$\dot{Q}_{elec} = ZT\Delta S - I\Delta V_{loss} \quad (47)$$

همان طور که اشاره شد، گرمای خالص باقیمانده از واکنش های انجام شده در پیل طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{elec} + \dot{Q}_{sh} - \dot{Q}_r \quad (48)$$

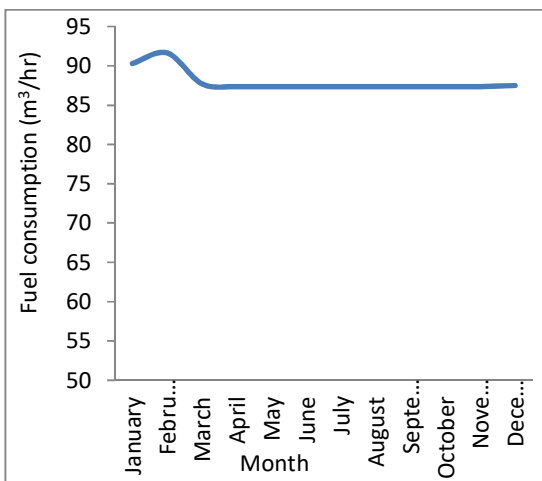
با توجه به رابطه (48) مقداری از این گرمای خالص صرف افزایش دمای گازهای ورودی و خروجی پیل شده ( $\dot{Q}'$ ) و بخش دیگری نیز به

نیست؛ چون دما بر این ناحیه بسیار تاثیر گذار بوده و با تغییر دما شرایط عملکردی پیل تفاوت زیادی پیدا می‌کند.



شکل ۳- تغییرات ولتاژ با چگالی جریان در دماهای مختلف بر حسب کلونین

شبیه‌سازی بر اساس ترکیب پیل سوختی به عنوان تأمین کننده حرارت پیش‌گرمایش و تولید برق، شیرهای فشار شکن به عنوان کاهش فشار برای تأمین فشار مناسب کارکرد پیل سوختی و یک بویلر به عنوان تأمین کننده گرمای پشتیبان صورت گرفته است. کارکرد پیل سوختی به صورت پایا در نظر گرفته شده و از فاکتورهای مؤثر در شروع به کار و خاموش شدن پیل سوختی صرف‌نظر شده است. توان خروجی از پیل سوختی در کل سال ثابت و ۹۰۰ کیلووات باقی می‌ماند. مصرف فصلی سوخت برای پیل و بویلر در طی سال در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مصرف سوخت سالیانه

مصرف سوخت در طی سال ثابت است و فقط در سه ماه زمستان این مقدار بیش از سایر ماه‌های سال است. در کل سال پیل سوختی توانایی تأمین گرمای مورد نیاز برای پیش‌گرمایش را دارد؛ ولی در زمستان به دلیل پایین بودن دمای گاز ورودی، نیاز است تا سوخت

در مراجع) با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [۱۷] مقایسه شده است. هم‌خوانی نزدیک بین این نتایج، صحت روش حاضر و کد تهیه شده را تأیید می‌کند. علت اختلاف اندک نتایج، عدم دسترسی به بعضی اطلاعات موجود در این مقالات و به دست آوردن این اطلاعات از مراجع دیگر (احتمالاً با اندکی اختلاف از مرجع [۱۰] است.

جدول ۲- نتایج حاصل از کد حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی

پارامترهای بررسی شده	نتایج عددی مرجع [۱۰]	نتایج عددی مرجع [۱۰]	نتایج تجربی سینگال [۱۷]	نتایج عددی مرجع [۱۷]
دمای کاری پیل (کلونین)	۱۱۶۶	۱۱۶۶	۱۲۷۳	۱۲۷۳
چگالی جریان (آمپر بر مترمربع)	۱۴۱۶	۱۴۱۶	۳۵۰۰	۳۵۰۰
فشار کاری پیل (بار)	۱/۳۴	۱/۳۴	۱	۱
ولتاژ سلول (ولت)	۰/۷۳۴	۰/۷۰۸	۰/۶۷	۰/۶۵

مقایسه بین نتایج به دست آمده برای ایستگاه تقلیل فشار بدون استفاده از پیل سوختی در این تحقیق و کار هاوادر [۱۲] که از سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز با رگلاتور استفاده شده است می‌تواند دقت و اعتبار نتایج سیستم را در جدول ۳ بیشتر نشان داد.

جدول ۳- نتایج حاصل از کد حاضر و نتایج عددی ایستگاه تقلیل فشار

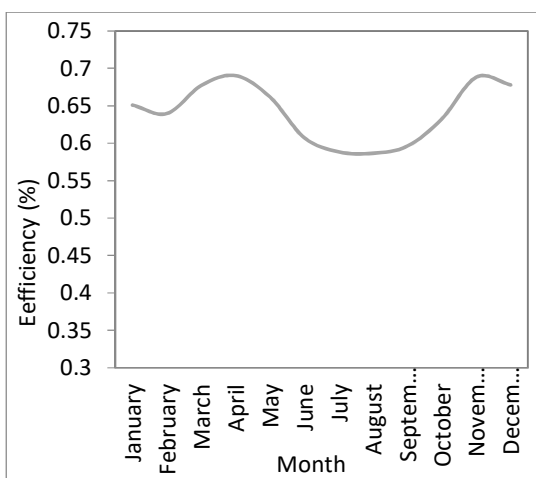
پارامترهای بررسی شده	نتایج مرجع [۱۸]	نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج مرجع [۱۸]
دمای ورودی گاز طبیعی (کلونین)	۲۷۷	۲۷۷
فشار ورودی گاز (کیلو پاسکال)	۵۸۰۰	۵۸۰۰
دبی ورودی (متر مکعب بر ساعت)	۱۲۵۰۰	۱۲۵۰۰
توان خروجی (کیلو وات)	۲۵۲	۲۶۷
بازده	۰/۵۸	۰/۶۰

### ۳-۲- سیستم پیل سوختی و رگلاتور

از آنجا که دما بر عملکرد پیل به شدت تاثیر گذار است در ابتدا، تاثیر دما بر عملکرد پیل در فشار ثابت (یک بار)، بررسی می‌گردد. مطابق شکل ۳، با افزایش دمای کاری پیل، ولتاژ تولیدی پیل افزایش می‌یابد. به این دلیل که با افزایش دما فعل و انفعال شیمیایی افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش ولتاژ می‌شود. در دانسیته جریان‌های بالا که افت‌های غلظتی اهمیت دارند اختلاف ولتاژ در دماهای مختلف بیشتر می‌شود. از این رو انتخاب ولتاژ در این محدوده برای پیل مناسب



انبساطی در طی سال را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که توان تولیدی در زمستان، بسیار زیادتر از مقدار توان تولیدی در تابستان است. این نتیجه، نشان دهنده وابستگی توان تولیدی توربین انبساطی به جریان گاز ورودی است. با توجه به شکل ۶، می‌توان دریافت در ماه‌هایی که نرخ جریان پایین‌تر از بیشینه جریان است، بیشتر توان تولیدی توسط پیل سوختی تولید می‌شود و توربین انبساطی توان بسیار کمی تولید می‌کند. توان تولیدی توسط پیل سوختی در کل سال دارای مقدار ثابت ۹۰۰ کیلو وات است که بسته به نوع پیل سوختی مورد استفاده، این مقدار متفاوت است. با مقایسه دو شکل ۶ و شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که تغییرات دو نمودار کاملاً مشابه یکدیگر است و بازدهی مجموعه برای فصل‌هایی که نرخ جریان ورودی کم است، افت زیادی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار بازدهی کل در طی سال

### ۳-۴- مقایسه عملکرد سیستم‌های مختلف

در این بخش عملکرد سیستم در سه حالت کارکرد شامل سه مورد زیر بررسی و مقایسه خواهد شد. مقایسه سیستم در سه حالت کارکرد شامل موارد زیر در انتخاب سیستم مناسب به ما کمک می‌کند.

- ۱) ایستگاه تقلیل فشار گاز با پیل سوختی با شیر فشار شکن
- ۲) ایستگاه تقلیل فشار گاز با پیل سوختی با توربین انبساطی
- ۳) ایستگاه تقلیل فشار گاز با بویلر با شیر فشار شکن

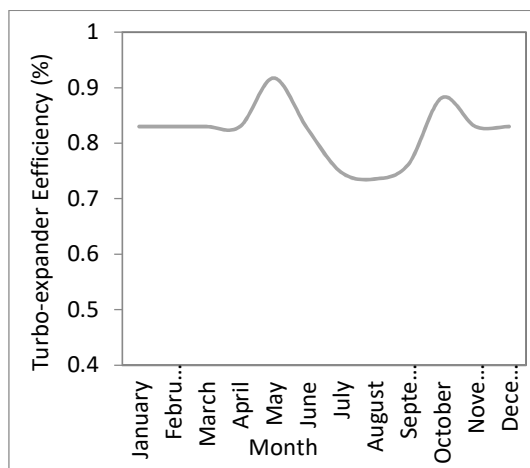
این مقایسه بر اساس گرمای مورد نیاز برای پیش‌گرمایش گاز ورودی، بازده سیستم، میزان توان تولیدی سیستم و مصرف سوخت صورت گرفته است. شکل ۸ میزان گرمای مورد نیاز برای پیش‌گرمایش گاز ورودی برای سیستم‌های شامل پیل سوختی و شیر فشار شکن، پیل سوختی با توربین انبساطی و سیستم بویلر با شیر فشار شکن را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود گرمای مورد نیاز برای ترکیب پیل سوختی و توربین انبساطی، بیشتر از ترکیب پیل سوختی با شیر فشار شکن و بویلر با شیر فشار شکن است. زیرا با وجود توربین انبساطی، گرمای بیشتری نیاز است تا دمای گاز ورودی بالاتر رود تا در توربین مورد استفاده قرار گیرد. میزان مصرف گاز برای ترکیب پیل سوختی با شیر فشار شکن و بویلر با شیر فشار شکن یکسان است، زیرا این سیستم‌ها

بیشتری برای گرم کردن گاز ورودی در بویلر مصرف شود. کل نرخ جرمی گاز مصرفی در طی سال برابر ۰/۴۸۱۱ کیلوگرم در ثانیه است که این میزان برابر ۰/۸۹ درصد کل نرخ جرمی گاز ورودی (۵۹/۹۷ کیلوگرم بر ثانیه) به سیستم در طی سال است.

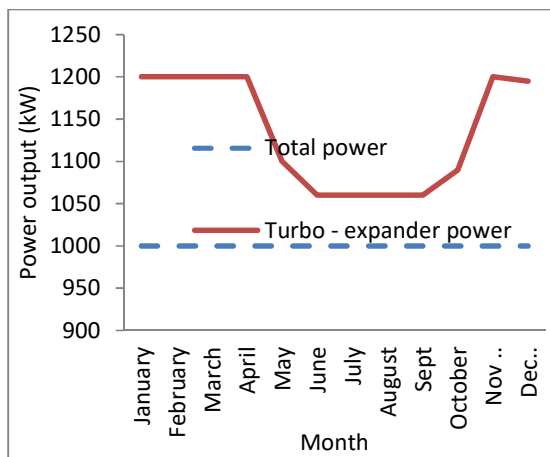
### ۳-۳- سیستم پیل سوختی و توربین انبساطی

برای شبیه‌سازی این مجموعه، پارامترها و شرایط توربین انبساطی بر روی نتایج تأثیر می‌گذارد. بدین منظور جریان طراحی برابر ۱۲۰۰۰ مترمکعب بر ساعت، جریان کمینه برابر ۴۸۰۰ مترمکعب بر ساعت و جریان بیشینه برابر ۱۸۰۰۰ مترمکعب بر ساعت در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده، میزان توان تولیدی و بازدهی توربین انبساطی در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص می‌باشد.



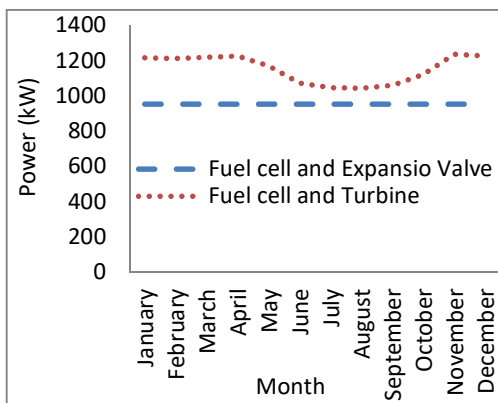
شکل ۵- نمودار بازدهی توربین انبساطی در طی سال

مطابق شکل ۵، بازدهی توربین انبساطی در ماه‌های اکتبر و می، بالاتر از سایر ماه‌های سال است، در حالی که با توجه به شکل ۴ میزان نرخ ورودی در این ماه‌ها از سه ماه اول سال کمتر است. این اتفاق به علت خواص طراحی توربین‌های انبساطی می‌افتد.

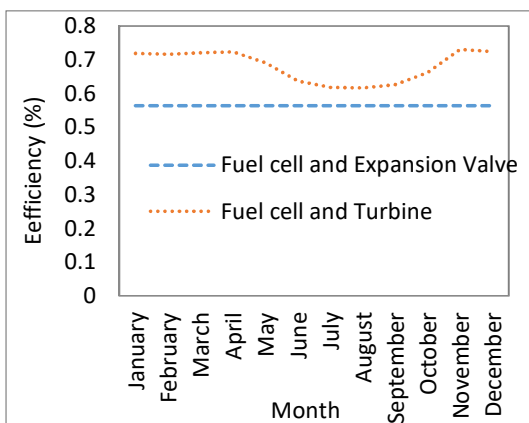


شکل ۶- نمودار توان تولیدی در طی سال

شکل ۵ توان تولید شده کل و توان تولید شده توسط توربین



شکل ۱۰- توان تولید شده برای دو حالت کارکرد سیستم



شکل ۱۱- بازده سیستمها

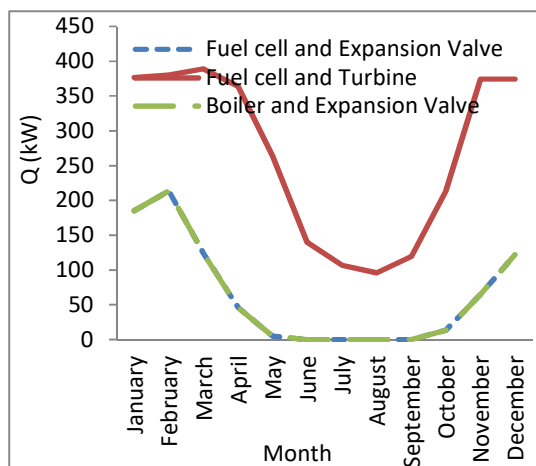
طبق شکل ۱۰ توان تولیدی توسط بویلر و شیر فشار شکن صفر است و در این حالت هیچ توانی توسط شیر فشار شکن و بویلر تولید نمی‌شود. توان تولیدی توسط پیل سوختی در طی یک سال ثابت است و به همین دلیل توان تولیدی و بازده سیستم پیل سوختی و شیر فشار شکن ثابت است. توان تولید شده توسط توربین انبساطی به این دلیل که به جریان گاز ورودی وابسته است، در طی یک سال تغییر می‌کند و در ماههایی که جریان ورودی بالایی به سیستم داشته باشیم، توان تولیدی و بازده سیستم پیل سوختی و توربین انبساطی بالا خواهد بود.

### ۳-۵- مصرف سوخت ایستگاه تقلیل فشار و مقایسه با نیروگاه سیکل ترکیبی

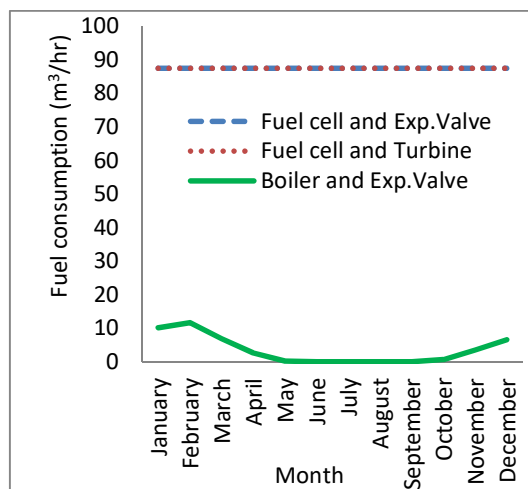
مصرف سوخت برای حالتی که سیستم مجهز به پیل سوختی باشد مطابق شکل ۴ است. برای ماههایی که دمای گاز ورودی به سیستم پایین باشد (ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر)، مصرف سوخت بالا می‌رود، زیرا نیاز است تا دمای گاز ورودی به توربین انبساطی مناسب باشد تا از یخ‌زدگی جلوگیری شود. شکل ۱۲ سیستم را در دو حالت کارکرد با پیل سوختی و بدون پیل سوختی را نمایش می‌دهد.

مشاهده می‌شود، مصرف سوخت در صورت نبود پیل سوختی کمتر از زمانی که پیل سوختی برای تولید توان و گرما در سیستم مورد استفاده قرار بگیرد است؛ زیرا پیل سوختی میزان مشخصی سوخت را برای تولید الکتریسیته و گرما صرف می‌کند که این گرما برای پیش

نیاز چندانی به پیش گرم کردن گاز ورودی ندارند. در شکل ۸ نیاز به گرم کردن گاز ورودی به ایستگاه تقلیل فشار در ماه‌های زمستان (ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر) بسیار بالاتر از سایر ماه‌ها است و این امری طبیعی است، زیرا دمای گاز ورودی در زمستان پایین است. شکل ۹ میزان مصرف سوخت در طی یک سال را برای عملکرد در سه سیستم ذکر شده نشان می‌دهد. میزان مصرف سوخت برای سیستم‌های پیل سوختی با شیر فشار شکن و پیل سوختی و توربین انبساطی یکسان است، زیرا فقط پیل سوختی است که میزان مشخصی سوخت برای تولید توان در این دو ترکیب مصرف می‌کند. در سیستم بویلر با شیر فشار شکن به دلیل مصرف سوخت در بویلر برای تولید گرما، منحنی مصرف سوخت در ماه‌های سرد (ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر) دارای مقادیر متفاوتی است.



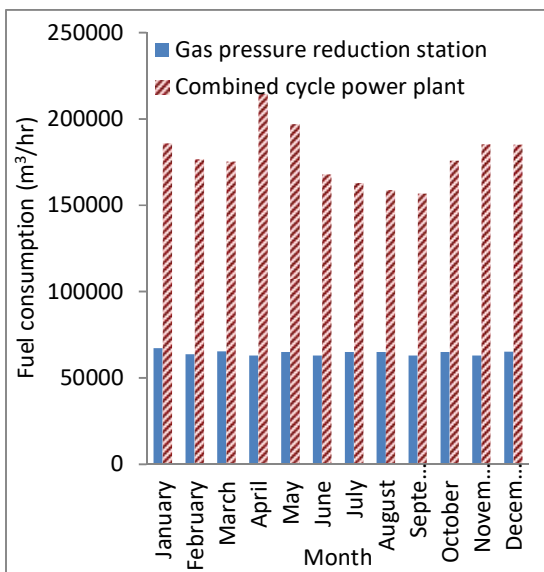
شکل ۸- میزان گرمای مورد نیاز برای پیش گرمایش گاز ورودی در سه حالت کارکرد سیستم



شکل ۹- میزان مصرف سوخت در سه حالت کارکرد سیستم

همچنین مقدار بازده و توان تولیدی توسط ترکیب پیل سوختی و توربین انبساطی، پیل سوختی با شیر فشار شکن و بویلر با شیر فشار شکن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.





شکل ۱۳- میزان مصرف سوخت ایستگاه تقلیل فشار و نیروگاه سیکل ترکیبی با توان تولیدی برابر

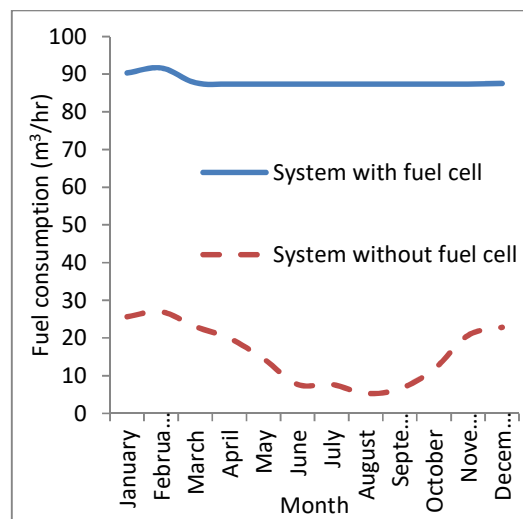
بررسی‌ها نشان می‌دهد که بازدهی کل سیستم با جریان ورودی به سیستم رابطه دارد و با افزایش دبی جرمی گاز ورودی به سیستم، بازدهی سیستم افزایش می‌یابد. با افزایش دبی ورودی به سیستم، میزان توان تولید شده در توربین انبساطی افزایش می‌یابد و از طرفی به علت ثابت بودن توان تولیدی پیل سوختی، توان تولیدی توسط توربین انبساطی تأثیر مستقیم بر روی بازده و توان تولیدی کل دارد، بنابراین با بالا رفتن جریان طراحی می‌توان توان تولیدی بیشتر و بازده بالاتر را به دست آورد.

افزایش شدن پیل سوختی به سیستم ایستگاه تقلیل فشار گاز، باعث افزایش راندمان کل سیستم در طی ماه‌های سرد سال (ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر) می‌شود، چون پیل سوختی در این ماه‌ها علاوه بر تولید الکتریسیته برای تولید گرما و بالا بردن دمای گاز ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از پیل سوختی برای ماه‌هایی که دمای گاز ورودی بالا و دبی پایین است، باعث کاهش راندمان می‌شود، به این علت که گرمای تولید شده توسط پیل، به علت بالا بودن دمای گاز ورودی، صرف بالا بردن دمای گاز نمی‌شود و از طرفی توان تولیدی توسط توربین انبساطی نیز پایین است. شبیه‌سازی انجام شده در مورد پیل سوختی بیان کننده این است که توان تولید شده در پیل سوختی با افزایش دما و فشار افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش دما بسیار بیشتر از افزایش فشار است، اما باید این نکته را نیز در نظر گرفت که محدودیت‌هایی برای کارکرد پیل در دما و فشار وجود دارد و افزایش دما بیش از اندازه باعث اختلال در کارکرد پیل می‌شود. این تحقیق برای شبیه‌سازی ایستگاه تقلیل فشار شهرکرد مورد استفاده قرار گرفته است و با تغییر پارامترهای توربین انبساطی، پیل سوختی، بویلر و داده‌های مربوط به گاز، از این کد می‌توان برای شبیه‌سازی سایر ایستگاه‌ها در سایر نقاط استفاده کرد.

گرمایش گاز ورودی به مدار استفاده می‌شود. همچنین در حالتی که پیل سوختی در مدار نیست، بویلر در ماه‌های سرد (ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر)، سوخت بیشتری را برای گرمایش گاز ورودی مصرف می‌کند.

برای بررسی صرفه اقتصادی توان تولیدی توسط ایستگاه تقلیل فشار گاز مجهز به پیل سوختی، می‌توان میزان مصرف سوخت ایستگاه تقلیل فشار را با یک نیروگاه تولید برق، برای تولید توان‌های یکسان مقایسه کرد. نیروگاه چرخه ترکیبی کرمان، یک نیروگاه تولید برق با ظرفیت ۱۲۷۲ مگاوات و سوخت مصرفی آن گاز طبیعی است [۱۹]. شکل ۱۳ میزان مصرف سوخت را برای ایستگاه تقلیل فشار و نیروگاه چرخه ترکیبی به ازای توان تولیدی برابر نشان می‌دهد.

میزان مصرف سوخت برای نیروگاه چرخه ترکیبی بسیار بالاتر از توان تولیدی توسط یک ایستگاه تقلیل فشار مجهز به پیل سوختی است. به این علت که بازدهی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد است؛ ولی این سیستم تقلیل فشار بررسی شده این مقدار چیزی در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد است. بنابراین با استفاده از سیستم ایستگاه تقلیل فشار به پیل سوختی می‌توان علاوه بر تولید گرما برای پیش گرمایش و تولید توان الکتریکی، مقدار زیادی در مصرف گاز طبیعی صرفه‌جویی به عمل آورد و در نتیجه آن از آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از استفاده بیش از حد نیروگاه‌های تولید برق کاست.



شکل ۱۴- مصرف سوخت سیستم در دو حالت با پیل سوختی و بدون پیل سوختی

#### ۴- نتیجه‌گیری

سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد- توربین انبساطی مطالعه شده در این تحقیق توسط نرم‌افزار EES شبیه‌سازی و داده‌های ورودی بر طبق داده‌های ایستگاه تقلیل فشار ایستگاه شهرکرد انتخاب شد. این شبیه‌سازی برای مشخص کردن عملکرد سیستم برای حالت‌ها و ورودی‌های مختلف انجام گرفت و تأثیر عواملی همچون فشار، دما و نرخ جریان ورودی به سیستم بر بازده و توان تولیدی توسط سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

۶- مراجع

[1] Poživil J., Use of expansion turbines in natural gas pressure reduction stations, *Acta, Montanistica Slovaca*, Vol. 9(3), pp. 258-260, 2004.

[2] Rami E. G., Jean-Jacques B., Bruno D. and François M., Modelling of a pressure regulator, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, pp. 234-243, 2007.

[3] Farzaneh-Gord M., Arabkoohsar A., Deymi Dasht-bayaz c M., Farzaneh-Kord V., Feasibility of accompanying uncontrolled linear heater with solar system in natural gas pressure drop stations, *Energy*, Vol. 41, pp. 420-428, 2012.

[4] Arabkoohsar A., Farzaneh-Gord M., Deymi-Dashtebayaz M., Machado L., Koury R.N.N., A new design for natural gas pressure reduction points by employing a turbo expander and a solar heating set, *Renewable Energy*, Vol. 81 pp. 239-250, 2015.

[5] Farzaneh-Gord M., Arabkoohsar A., Deymi Dasht-bayaz M., Machado L., Koury R.N.N., Energy and exergy analysis of natural gas pressure reduction points equipped with solar heat and controllable heaters, *Renewable Energy*, Vol. 72, pp. 258-270, 2014.

[6] Zabihi A. and Taghizadeh M., Feasibility study on energy recovery at Sari-Akand city gate station using turboexpander, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 152-159, 2016.

[7] Hosseini S., Ahmed K. and Tade M. O., CFD model of a methane fueled single cell SOFC stack for analyzing the combined effects of macromicro structural parameters," *Journal of Power Sources*, vol. 234, pp. 180-196, 2013.

[8] Andersson M., Yuan J. and Sunden B., SOFC modeling considering hydrogen and carbon monoxide as electrochemical reactants, *Journal of Power Sources*, Vol. 232, pp. 42-54, 2013.

[9] P. Tippawan and Arpornwichanop A., Energy and exergy analysis of an ethanol reforming process for solid oxide fuel cell applications, *Bioresource Technology*, Vol. 157, pp. 231-239, 2014.

[۱۰] ج. پیرکندی، م. قاسمی و م. ح. حامدی، مقایسه‌ی عملکرد سیستم‌های هیبریدی مستقیم و غیر مستقیم توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد از دیدگاه ترمودینامیکی و انرژی، *مجله ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس شماره ۱۲، ص ۱۱۷-۱۳۹۱*.

[11] Chan S. H., HoH K. and Tian Y., Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant, *Journal of Power Sources*, Vol. 109, pp. 111-120, 2002.

[12] Motahar S. and Alamrajabi A. A., Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 2396-2407, 2009.

[13] Bavarsad P. G., Energy and Exergy Analysis of Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System, *International Journal of Energy Research*, Vol. 32, pp. 4591-4549, 2007.

[14] Pirkandi J., Mahmoodi M. and Ommian M., An optimal configuration for a solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system based on thermo-economic modelling, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 144, pp. 375-386, 2017.

[15] Pirkandi J., Mahmoodi M. and Ommian M., Thermo-economic performance analysis of a gas turbine generator equipped with a pressurized and an atmospheric solid oxide fuel cell, *Energy Conversion and Management*, Vol. 136, pp. 249-261, 2017.

[16] Neseli M. A., Ozgener O. and Ozgener L., Thermo-mechanical exergy analysis of Marmara Eregli natural gas pressure reduction station (PRS): An application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, pp. 80-88, 2017.

[17] Singhal S., Advances in solid oxide fuel cell technology, *Solid state ionics*, Vol. 135, No. 1, pp. 305-313, 2000.

[18] Howard C., Oosthuizen P. and Peppley B., An investigation of the performance of a hybrid turboexpander-fuel cell system for power recovery at natural gas pressure reduction stations, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2165-2170, 2011.

[19] <http://www.kpp.co.ir/>.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$A$	مساحت
$c_p$	گرمای ویژه
$D_{eff}$	ضریب پخش دوگانه
$D$	ضریب پخش
$E$	ولتاژ پیل در شرایط استاندارد
$E_{act}$	انرژی فعال‌سازی
$F$	ثابت فارادی (۹۶۴۸۷)
$HHV$	ارزش حرارتی بالای سوخت
$h$	آنتالپی
$i$	چگالی جریان
$i_0$	چگالی جریان تبادل
$i_L$	چگالی جریان حدی
$I$	جریان الکتریکی
$M$	جرم مولکولی
$\dot{m}$	دبی جرمی سوخت
$n$	تعداد سل‌های پیل سوختی
$n_e$	تعداد الکترون جریان یافته
$P$	فشار
$Q$	آهنگ انتقال گرما
$r_{por}$	شعاع متوسط منافذ
$R_u$	ثابت عمومی گازها (۸/۳۱۴)
$s$	آنتروپی
$T$	دما
$V$	ولتاژ

علائم یونانی

$\eta$	بازدهی
$\varepsilon$	ضریب کارایی
$\varepsilon_i$	ضریب تخلخل
$\rho$	چگالی
$\delta$	ضخامت

زیرنویس

act	افت ولتاژ فعال‌سازی
an	آند
b	بوپلر
conc	افت ولتاژ غلظتی
ca	کاتد
cell	پیل
el	الکترولیت
FC	پیل سوختی
I	ورودی
gen	ژنراتور
loss	تلفات
ohm	افت ولتاژ اهمی
sys	سیستم
tot	کل

پیل هیبریدی سیستم عملکرد عملکرد اکسید جامد ...