

مدل سازی و تحلیل عملکرد یک چرخه هیبریدی موتور استرلینگ، توربین گاز و پیل سوختی جهت کاربرد در یک سیستم تولید همزمان

جاماسب پیرکندی^۱، مهران نصرت الهی^۲ و شهرام خداپرست^۳

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران (نویسنده مخاطب)، jpirkandi@mut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، mnosratollahi@gmail.com

۳- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، khodaparast85@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۴/۱۰/۱۵، پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۲)

چکیده: در این مقاله، عملکرد یک چرخه توربین گاز مجهز به پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ از دیدگاه ترمودینامیکی بررسی شده و برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به کار رفته در آن، یک تحلیل الکتروشیمیایی و حرارتی مجزا انجام شده است. با مطالعه پارامتری سیستم هیبریدی تأثیر نسبت فشار کمپرسور، دمای گازهای ورودی به توربین، تعداد سل‌های پیل سوختی، نوع سیال مورد استفاده در موتور استرلینگ و سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ بر روی بازده و توان تولیدی سیستم هیبریدی بررسی می‌شود. براساس مقایسه انجام شده توان تولیدی سیستم پیشنهادی در حدود سه برابر توان تولیدی چرخه ساده توربین گاز و $1/3$ برابر توان تولیدی سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بازده الکتریکی سیستم پیشنهادی در حدود ۸۲ درصد بوده و این در حالی است که بازده سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی در حدود ۵۰ درصد و چرخه ساده توربین گاز ۳۰ درصد است.

کلیدواژگان: موتور استرلینگ، پیل سوختی اکسید جامد، توربین گاز، سیستم هیبریدی

مقدمه

بحران انرژی در دنیا پژوهشگران را بر آن داشته تا در جهت صرفه جویی در مصرف انرژی، اقدامات چشمگیری به عمل آورند و در این راستا توجهات لازم و کوشش‌های جدی در مسیر بهینه‌سازی دستگاه‌های تولید و مصرف‌کننده انرژی انجام داده‌اند. با توجه به روند روبه‌رشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی کمتر در اولویت قرار گرفته است. امروزه، با گسترش سیستم‌های مختلف تولید انرژی، روش‌های گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها، دیزل ژنراتورها و موتورهای استرلینگ مورد توجه قرار گرفته‌اند که هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خودند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم‌هزینه و همیشه در دسترس استفاده از پیل‌های سوختی را به‌عنوان یک کاندیدای مهم معرفی کرده است. پیل‌های سوختی یک مبدل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی هستند که امروزه به‌عنوان یک فناوری جدید در تولید انرژی محسوب می‌شوند. در میان پیل‌های سوختی موجود، پیل سوختی اکسید جامد، به دلیل دمای کاری بالا (۷۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس)، پتانسیل بسیار خوبی برای کاربرد در سیستم‌های تولید هم‌زمان و ترکیبی را داراست [۲، ۱]. همچنین، افزایش قیمت انرژی و آلودگی‌های محیطی و صوتی در جهان باعث شده است تا تحقیقات بر روی موتورهای جدید تولید توان، با جدیت بیشتری صورت گیرد. خواسته‌های عمومی از ایده‌های جدید شامل بازده مناسب، آلودگی کم و اقتصادی بودن است. موتور استرلینگ از جمله ایده‌هایی است که در سال‌های اخیر علاقه‌مندان زیادی را به خود جلب کرده است. به لحاظ فیزیکی، موتور استرلینگ

یک موتور احتراق خارجی بوده و نسبت به موتور بنزینی و دیزلی کارایی بیشتری داشته و می‌تواند از هر نوع منبع حرارتی خارجی (انرژی احتراقی، خورشیدی و پسماند حرارتی ماشین‌آلات صنعتی) برای تولید انرژی مکانیکی استفاده کند [۳]. موتورهای استرلینگ در حالت ایدئال از دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند دما ثابت تشکیل شده است. گازهایی که درون موتور استرلینگ استفاده می‌شوند هرگز از موتور خارج نشده و در چنین موتورهایی هیچ احتراقی صورت نمی‌گیرد. از سوی دیگر در این موتورها هیچ گاز خروجی وجود نداشته و هیچ صدای انفجاری نیز شنیده نمی‌شود، به همین دلیل، چنین موتورهایی فاقد صدایند [۴]. در این مقاله، سیستم هیبریدی پیشنهادی ترکیبی از توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ است که برای نخستین بار، جهت کاهش تلفات حرارتی و افزایش میزان توان الکتریکی تولیدی پیشنهاد شده است. در سیستم هیبریدی جدید از انرژی گازهای خروجی توربین به‌عنوان منبع گرمایی برای موتور استرلینگ استفاده شده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در جهان در مورد ترکیب سیستم‌های هیبریدی دوگانه (توربین گاز و پیل سوختی یا پیل سوختی و موتور استرلینگ) بوده و سیستم سه‌گانه کمتر مورد توجه بوده است. در ایران نیز بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه ترکیب توربین گاز و پیل سوختی اکسید جامد مرسوم بوده است.

پولیکاس و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی به معرفی تکنولوژی جدید توربین گاز و کاربردهای آن در آینده پرداختند. آن‌ها، در ابتدا، اهمیت سیستم‌های هیبریدی را بیان کرده و سپس سیستم‌های هیبریدی جدید برپایه توربین گاز را معرفی کردند. در ادامه، سه نوع ترکیب توربین گاز-موتور دیزل، توربین گاز-موتور استرلینگ و توربین گاز-پیل سوختی را معرفی و توضیحاتی در خصوص آنها ارائه کردند [۵]. کارلوس و همکاران در سال ۲۰۱۱ تحلیل ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ را جهت کاربرد در یک نیروگاه تولید توان بررسی کردند. آن‌ها ابتدا محاسبات کامل الکتروشیمیایی، حرارتی و ترمودینامیکی را در پیل سوختی انجام داده و ترکیب شیمیایی گازهای خروجی از پیل و دمای آن را محاسبه کردند. در سیستم پیشنهادی آنها گازهای خروجی از پیل سوختی وارد محفظه پس‌سوز شده و با هم واکنش می‌دهند و سپس در ادامه به سمت موتور استرلینگ حرکت کرده و گرمای لازم برای کارکرد آن را فراهم می‌کنند. آن‌ها در تحلیل سیستم خود از گاز طبیعی، آمونیاک و متانول استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در صورت استفاده از گاز طبیعی بازده سیستم بیشتر بوده و به ۵۹/۱ درصد می‌رسد [۶]. چن و همکاران در سال ۲۰۱۴ عملکرد یک سیستم هیبرید پیل سوختی و موتور استرلینگ را بررسی کردند. آن‌ها ابتدا یک تحلیل ترمودینامیکی برای تمام اجزای سیستم و سپس یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا برای پیل سوختی اکسید جامد انجام دادند و در ادامه عملکرد سیستم را تحلیل کرده و با بهینه‌سازی بازگشت‌ناپذیری‌ها در پیل سوختی، توان تولیدی و بازده سیستم را افزایش دادند. آن‌ها در این تحقیق تأثیر چگالی جریان، دما و فشار کاری پیل را بر روی بازده و توان تولیدی سیستم بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش چگالی جریان و افزایش دمای کاری پیل بازده و توان تولیدی سیستم هیبریدی افزایش یافته و به حدود ۸۸ درصد می‌رسد [۷]. مسعود رکنی در سال ۲۰۱۴ تحلیل یک سیستم هیبریدی پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ را با استفاده از سوخت زیست‌توده^۱ جهت کاربرد در یک سیستم تولید هم‌زمان بررسی کرد. وی ابتدا محاسبات کامل شیمیایی برای تبخیر و تبدیل گازهای حاصل از سوختن چوب به متان و در ادامه محاسبات کامل الکتروشیمیایی و حرارتی را برای پیل سوختی و محاسبات ترمودینامیکی را برای موتور استرلینگ انجام داد. نتایج وی نشان داد که بازده حرارتی سیستم به ۴۲/۴ درصد و بازده الکتریکی سیستم به ۶۵ درصد می‌رسد. سیستم هیبریدی پیشنهادی وی قادر بود ۱۲۰ کیلووات برق تولید کند [۸].

بررسی تحقیقات انجام‌شده در زمینه سیستم‌های هیبریدی نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات صورت‌گرفته در مورد سیستم‌های دوگانه بوده و در مورد سیستم‌های سه‌گانه تحقیقی انجام نشده است. هدف از ارائه این مقاله معرفی یک سیستم هیبریدی جدید با بازده بالا و متشکل از توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد و موتور استرلینگ است. در این مقاله، ابتدا یک

سیستم هیبریدی همراه با تجهیزات جانبی آن در نظر گرفته شده، سپس برای تمام اجزای چرخه مورد نظر یک تحلیل ترمودینامیکی و برای پیل سوختی به کار رفته در آن یک تحلیل الکتروشیمیایی و حرارتی مجزا و کامل انجام می‌شود. همچنین، در این مقاله محاسبات موتور استرلینگ با فرض اشمیت انجام شده که بازده حاصل از این روش به بازده موتور کارنو نزدیک است. در ادامه، با مطالعه پارامتری سیستم هیبریدی اشاره شده، تأثیر پارامترهای دما و فشار کاری پیل، نسبت فشار کمپرسور، دمای گازهای ورودی به توربین، نوع سیال مورد استفاده در موتور استرلینگ، سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ و تعداد سل‌های به کار رفته در پیل بر روی بازده الکتریکی و توان تولیدی سیستم بررسی می‌شود.

ترکیب بندی سیستم هیبریدی

طرحواره سیستم هیبریدی که در این تحقیق مطالعه شده، در شکل ۱، نشان داده شده است. سیستم پیشنهادی شامل یک توده پیل سوختی اکسید جامد، محفظه احتراق، توربین گاز، موتور استرلینگ، کمپرسور هوا، شیر فشارشکن، مخزن سوخت، پنج مبدل حرارتی و یک بازیاب حرارتی است. سوخت به کار رفته در سیستم هیدروژن بوده و ترکیب هوای به کار رفته نیز شامل ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن در نظر گرفته شده است.

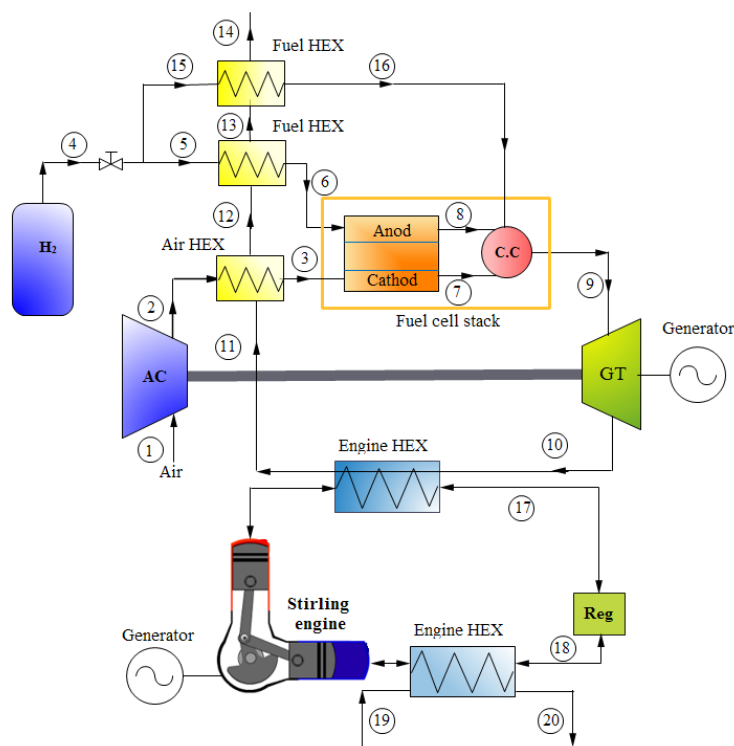


Figure 1- Schematic of hybrid system

شکل ۱- ترکیب بندی سیستم هیبریدی پیشنهادی

هوای به کار رفته در سیستم ابتدا به وسیله کمپرسور هوا متراکم شده و در ادامه مسیر، با عبور از مبدل حرارتی، با دمای بالا وارد بخش کاتد پیل سوختی می‌شود. از سوی دیگر، در این سیستم، یک مخزن حاوی گاز هیدروژن تحت فشار قرار دارد. هیدروژن با گذشتن از یک شیر فشارشکن وارد مبدل حرارتی شده و پس از گرم شدن وارد بخش آند پیل سوختی می‌شود. پس از انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در پیل سوختی، هوا و سوخت باقی مانده در ادامه وارد محفظه احتراق می‌شوند. واکنش

هیدروژن و اکسیژن در پیل توان الکتریکی قابل ملاحظه‌ای تولید می‌کند که باعث افزایش بازده سیستم هیبریدی می‌شود. در محفظه احتراق برای بالابردن دمای محصولات احتراق از یک جریان جداگانه سوخت استفاده می‌شود. پس از انجام واکنش در محفظه احتراق، محصولات خروجی با دمای بالا وارد توربین شده و در اثر انبساط کار مکانیکی تولید می‌کنند. گازهای داغ پس از خروج از توربین و در ادامه مسیر خود وارد مبدل حرارتی موتور استرلینگ شده و گرمای لازم برای کارکرد موتور را فراهم می‌کنند. موتور استرلینگ با دریافت گرما شروع به کار کرده و توان الکتریکی تولید می‌کند که باعث افزایش بازده سیستم هیبریدی می‌شود. در ادامه، گازهای خروجی از مبدل موتور وارد سه مبدل حرارتی معرفی شده می‌شوند. در سیستم هیبریدی پیشنهادی، هر سه بخش پیل سوختی، توربین گاز و موتور استرلینگ، به صورت مجزا، توان الکتریکی تولید می‌کنند و این مسئله باعث افزایش بازده و توان تولیدی سیستم می‌شود.

فرضیات

در مدل سازی و تحلیل سیستم هیبریدی پیشنهادی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- کلیه اجزای چرخه ترکیبی بی‌دررو فرض می‌شوند.
- جریان سیال در کلیه اجزا پایاست.
- رفتار تمام گازها ایدئال فرض شده است.
- از اثرات مربوط به خنک کاری کمپرسور صرف نظر شده است.
- سوخت مورد مصرف در سیستم هیبریدی و سیال عامل مورد استفاده در موتور استرلینگ هیدروژن فرض شده است.
- از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرف نظر شده است.
- ولتاژ در زیر توده‌های پیل سوختی ثابت فرض شده است.
- فرایندهای تراکم و انبساط در موتور استرلینگ دما ثابت فرض شده است.
- از افت‌های مربوط به بازیاب موتور استرلینگ صرف نظر شده است.
- از هوا برای خنک کاری موتور استرلینگ استفاده شده است.
- موتور استفاده شده در این سیستم، موتور استرلینگ نوع آلفاست.

معادلات حاکم

در این بخش، ابتدا با استفاده از روابط موجود عملکرد تمامی اجزای به کار رفته در سیستم پیشنهادی معرفی شده و سپس تحت شرایط پایدار سیستم فوق تحلیل و بررسی شده است. برای این کار، یک برنامه رایانه‌ای در نرم افزار EES^۱ نوشته شده و سپس عملکرد سیستم با تغییر چند پارامتر موثر، مانند نسبت فشار کاری کمپرسور، دمای گازهای ورودی به توربین، تعداد سل‌های پیل سوختی، نوع سیال مورد استفاده در موتور استرلینگ و غیره، بررسی شده است.

مدل سازی پیل سوختی

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 می‌شود [۹].

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

در رابطه (۱)، E° ولتاژ پیل سوختی در شرایط استاندارد، R_u ثابت عمومی گازها و T دمای توده پیل است. برای محاسبه ولتاژ واقعی پیل، باید افت‌های مربوط به پیل (اضافه‌ولتاژ پیل)، که شامل افت ولتاژ ناحیه فعال‌سازی V_{act} ، افت ولتاژ ناحیه اهمیک V_{ohm} و افت ولتاژ ناحیه غلظت V_{con} هستند، محاسبه شده تا در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن، V_{cell} ، به‌دست آید [۹].

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{con}) = E - \Delta V_{loss} \quad (2)$$

مقدار افت مربوط به فعال‌سازی شامل افت‌های مربوط به راه‌اندازی پیل و همچنین، غلبه بر واکنش‌های الکتروشیمیایی است. مقدار این افت برابر مجموع اضافه‌ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد در پیل سوختی بوده و براساس رابطه باتلر ولمر (روابط زیر) به‌دست خواهد آمد [۹].

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (3)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_0} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، i و i_0 به‌ترتیب برابر چگالی جریان و چگالی جریان تبادلی است. محاسبه مقدار چگالی جریان تبادلی به‌صورت دقیق بسیار پیچیده است. برای پیل سوختی اکسید جامد از دو رابطه نیمه‌تجربی زیر برای محاسبه آن استفاده می‌شود [۹].

$$i_{0,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left(- \frac{E_{act,an}}{R_u T} \right) \quad (5)$$

$$i_{0,ca} = \gamma_{ca} \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left(- \frac{E_{act,ca}}{R_u T} \right) \quad (6)$$

در معادلات (۵) و (۶)، γ پارامتری است که به جنس الکتروآند و کاتد بستگی دارد. E نیز مقدار انرژی فعال‌سازی است. برای پیل سوختی اکسید جامد مقادیر مورد نیاز برای محاسبه ولتاژ ناحیه فعال‌سازی در جدول ۱ آورده شده است [۹].

جدول ۱- پارامترهای مربوط به افت ولتاژ فعال‌سازی [۹]
Table 1- Parameters related to activation over voltage [9]

Parameter	Value
$E_{act,an}(\text{kJ/kmol})$	110000
$E_{act,ca}(\text{kJ/kmol})$	155000
$\gamma_m(\text{A/m}^2)$	$7 * 10^9$
$\gamma_m(\text{A/m}^3)$	$7 * 10^9$

تلفات اهمی ناشی از حرکت الکترون‌ها در آند، کاتد و متصل‌کننده داخلی و حرکت یون‌ها در الکترولیت است. این مقاومت ذاتی در یک پیل سوختی به‌خاطر تغییرات در دمای سل ایجاد می‌شود. از این رو این مقاومت‌ها از قانون اهم پیروی کرده و بر این اساس افت ولتاژ اهمی برای این چهار جزء، با استفاده از روابط زیر، به‌دست می‌آید [۹]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (7)$$

$$V_{ohm} = ir \quad (8)$$

$$r = \delta \rho \quad (9)$$

$$\rho = A \exp \left(\frac{B}{T} \right) \quad (10)$$

مقادیر A ، B و δ پارامترهای ثابتی بوده که بسته به نوع و هندسه پیل به دست می‌آیند [۹]. مقادیر این پارامترها، که در محاسبات افت ولتاژ اهمیت استفاده می‌شوند، در جدول ۲ آورده شده است [۹]:

جدول ۲- پارامترهای مربوط به افت ولتاژ اهمیک [۹]
Table 2- Parameters related to ohmic over voltage [9]

Component	$\delta(\text{m})$	$B(\text{K})$	$A(\Omega\text{-m})$
Cathode	0.0022	600	0.0000811
Anode	0.0001	-1392	0.0000298
Electrolyte	0.00004	10350	0.0000294
Internal Connectors	0.000085	4690	0.0012

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته می‌شود، نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق نداشته و این مسئله باعث افت ولتاژ شدید در پیل می‌شود. افت مربوط به غلظت در چگالی جریان‌های بالا اهمیت پیدا می‌کند. مقدار این افت با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳) به دست خواهد آمد [۹]:

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca} \quad (11)$$

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{1 - \frac{i}{i_{L,H_2}}}{1 + \frac{i}{i_{L,H_2O}}} \right) \quad (12)$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{i}{i_{L,O_2}}} \right) \quad (13)$$

در روابط فوق، i_L چگالی جریان حدی و n_e تعداد مول‌های الکترون شرکت‌کننده در واکنش است. چگالی جریان حدی جریانی است که در آن نرخ مصرف سوخت برابر زمانی است که بیشترین سرعت تغذیه سوخت برقرار است و این در زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت روی سطح به صفر برسد؛ یعنی تمام واکنش دهنده‌ها مصرف شوند. چگالی جریان حدی برای هیدروژن، آب و اکسیژن طبق روابط (۱۴) تا (۱۶) به دست می‌آید [۹]:

$$i_{L,H_2} = \frac{n_e F D_{eff,H_2}}{R_u T \delta_{an}} P_{H_2} \quad (14)$$

$$i_{L,H_2O} = \frac{n_e F D_{eff,H_2O}}{R_u T \delta_{an}} P_{H_2O} \quad (15)$$

$$i_{L,O_2} = \frac{n_e F D_{eff,O_2}}{R_u T \delta_{an}} P_{O_2} \quad (16)$$

در روابط بالا، δ_{ca} و δ_{an} ضخامت‌های آند و کاتد و D_{eff} ضریب پخش موثر گاز است. پس از محاسبه افت ولتاژهای اشاره شده مقدار ولتاژ واقعی پیل طبق رابطه (۲) و مقدار جریان هر سلول و توان کلی توده پیل نیز طبق روابط (۱۷) تا (۲۰) مشخص خواهد شد.

$$I_{cell} = i A_{cell} \quad (17)$$

$$I_{tot} = 2Fz \quad (18)$$

$$(\dot{W}_{DC})_{sofc} = V_{cell} I_{tot} \quad (19)$$

$$(\dot{W}_{AC})_{sofc} = (\dot{W}_{DC})_{sofc} \times \eta_{inv,sofc} \quad (20)$$

با توجه به تولید برق مستقیم در پیل، با استفاده از رابطه (۲۰) مقدار برق متناوب در آن محاسبه می‌شود. در این رابطه، $\eta_{inv,sofc}$ ضریب تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب در پیل سوختی است [۹].

در این تحقیق، برخلاف بیشتر تحقیقات انجام‌شده، دمای پیل ثابت فرض نشده است. این مسئله سبب می‌شود که محاسبات حرارتی پیل برای تعیین دمای کاری آن انجام گیرد. برای محاسبه دمای گازهای خروجی از پیل، باید منابع دمایی موجود در پیل را در نظر گرفت (رابطه (۲۱)) [۱۰].

$$\dot{Q}_{elec} = zT \Delta S - I \Delta V_{Loss} \quad (21)$$

با توجه به رابطه (۲۲)، مقداری از این گرمای خالص باقی‌مانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده (\dot{Q}') و بخش دیگری نیز به محیط (\dot{Q}_{surr}) وارد می‌شود.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{surr} \quad (22)$$

در حالت واقعی، به هیچ عنوان، نمی‌توان فرآیندهای انجام‌شده در پیل سوختی را بی‌دررو در نظر گرفت و همواره مقداری تلفات حرارتی به محیط وجود دارد. با در نظر گرفتن این مسئله در حالت ایدئال فرض می‌شود که پیل سوختی بی‌دررو داخلی بوده و گرمای خالص باقی‌مانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی از آن خواهد شد (\dot{Q}'') . در این حالت، با در نظر گرفتن دمای یکسان برای گازهای خروجی از آند و کاتد، رابطه (۲۳) حاصل خواهد شد. در این رابطه، $\Delta h_{ca,in}$ و $\Delta h_{an,in}$ مقدار تغییرات آنتالپی واکنش‌دهنده‌ها در آند و کاتد و $\Delta h_{ca,out}$ و $\Delta h_{an,out}$ مقدار تغییرات آنتالپی محصولات در آند و کاتد خواهند بود.

$$\dot{Q}'' = \Delta h_{ca,in} + \Delta h_{ca,out} + \Delta h_{an,in} + \Delta h_{an,out} \quad (23)$$

برای محاسبه دمای گازهای خروجی از پیل سوختی از یک الگوریتم تکرار استفاده شده و معیار همگرایی نیز به صورت رابطه (۲۴) در نظر گرفته شده است.

$$Q_{error} = \left| \frac{\dot{Q}'' - \dot{Q}'}{\dot{Q}''} \right| < 0.01 \quad (24)$$

پس از محاسبه دمای خروجی، می‌توان با استفاده از رابطه (۲۵) مقدار تلفات حرارتی در پیل سوختی را محاسبه کرد.

$$(\dot{n}_3 \bar{h}_3 + \dot{n}_6 \bar{h}_6) = \dot{Q}_{error} + \dot{W}_{sofc} + (\dot{n}_7 \bar{h}_7 + \dot{n}_8 \bar{h}_8) \quad (25)$$

پیل‌های سوختی اکسید جامد را می‌توان از نظر ساختار و نوع طراحی به دو دسته عمده لوله‌ای و صفحه‌ای تقسیم‌بندی کرد. پیل‌های سوختی نوع لوله‌ای، الکترودها و الکترولیت به شکل یک لوله بوده و تعدادی از آنها در یک مجموعه قرار گرفته‌اند. ساختار لوله‌ای پیل مشکل آب‌بندی نداشته و دارای کمترین نشت گاز است. از طرف دیگر، دمای کاری این نوع پیل‌ها بالا بوده و بازده آن‌ها بیشتر است. پیل‌های سوختی به کار رفته در این تحقیق از نوع لوله‌ای بوده و مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آمده است [۱۱].

برای کلیه اجزای سیکل توربین گاز از جمله کمپرسور هوا، توربین، محفظه احتراق و مبدل‌های حرارتی، با استفاده از فرمول‌های موجود در مراجع [۱۲ و ۱۳]، تحلیل‌های ترمودینامیکی لازم صورت گرفته است. در دو مبدل حرارتی استفاده‌شده در موتور استرلینگ، طبق قانون اول ترمودینامیک، دمای ورودی به موتور استرلینگ و خروجی از مبدل براساس روابط (۲۶) تا (۲۸) محاسبه می‌شود [۱۴، ۱۵].

$$Q = \dot{n}_{10}(h_{10} - h_{11}) \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{in,ST} = \varepsilon_{rec,e} \times Q \quad (27)$$

$$\dot{Q}_{ST} = \dot{n}_{st} \Delta h \quad (28)$$

جدول ۳- مشخصات هندسی پیل سوختی به کار رفته در این پژوهش [۱۱]

Table 3- Geometric characteristics of fuel cell [11]

Parameters	unit	the amount of assumed
Cell area	m ²	0.10362
Length of each cell	m	1.5
Diameter of each cell	m	0.022
Number of cells	-	5760

مدل سازی موتور استرلینگ

گازهای داغ خروجی از توربین در ادامه وارد مبدل حرارتی مربوط به موتور استرلینگ شده و گرمای لازم برای کارکرد موتور را تأمین می‌کنند. برای تحلیل موتور استرلینگ سه فرض همدم، بی‌دررو و اشمیت وجود دارد که در این تحقیق از فرض اشمیت، به‌علت نزدیک بودن بازده آن به بازده کارنو استفاده شده است. فرض اساسی در این تحلیل این است که گاز در محفظه انبساط و گرم‌کن، در دمای گرم‌کن و در محفظه تراکم و خنک‌کن، در دمای خنک‌کن نگه داشته می‌شود. نقطه شروع تحلیل، ثابت‌گرفتن جرم کل در تمام حجم‌های اشغال‌شده توسط گاز است. ابتدا، با داشتن زاویه میل‌لنگ حجم فضای تراکم و انبساط سیلندر به‌دست می‌آید. زاویه میل‌لنگ با پارامتر θ بیان می‌شود. حجم فضای انبساط برحسب مترمکعب و با استفاده از رابطه (۲۹) به‌دست می‌آید [۱۶، ۱۵].

$$V_E = V_{cle} + 0.5.V_{swe} [1 + \cos(\theta + \alpha)] \quad (29)$$

در معادله بالا، V_{cle} حجم فضای خالی محفظه انبساط، V_{swe} حجم جاروب‌شده محفظه انبساط برحسب مترمکعب و α زاویه بین دو پیستون نسبت به هم و برحسب درجه است. همچنین، حجم فضای تراکم با استفاده از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود [۱۶، ۱۵].

$$V_C = V_{cle} + 0.5.V_{swc} [1 + \cos(\theta)] \quad (30)$$

در معادله بالا، V_{cle} حجم فضای خالی محفظه تراکم، V_{swc} حجم جاروب‌شده محفظه تراکم برحسب مترمکعب و θ زاویه میل‌لنگ برحسب درجه است. حجم کلی موتور طبق رابطه (۳۱) به‌دست می‌آید.

$$V = V_E + V_R + V_C + V_K + V_H \quad (31)$$

در معادله بالا، V_R حجم بازیاب موتور، V_K حجم خنک‌کن و V_H حجم گرم‌کن موتور استرلینگ برحسب مترمکعب است.

برای محاسبه کار قسمت تراکم و انبساط از برخی نسبت‌ها و تحلیل موتور استرلینگ نوع آلفا استفاده می‌شود، که طبق روابط (۳۲) تا (۳۵) محاسبه می‌شوند [۱۷، ۱۶].

$$C = (1/2) \cdot \sqrt{\left(\frac{V_{swe}}{T_h}\right)^2 + 2 \frac{V_{swe}}{T_h} \cdot \frac{V_{swc}}{T_k} \cos(\alpha) + \left(\frac{V_{swc}}{T_k}\right)^2} \quad (32)$$

$$S = \left(\frac{V_{swc}}{2T_k} + \frac{V_{clc}}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r \ln(T_h/T_k)}{T_h - T_k} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_{cle}}{T_h} + \frac{V_{swe}}{2T_h} \right) \quad (33)$$

$$b = \frac{C}{S} \quad (34)$$

$$\tan(\beta) = \left(\frac{V_{swe} \sin(\alpha)/T_h}{V_{swc} \cos(\alpha)/T_h - V_{swc}/T_k} \right) \quad (35)$$

در معادله‌های بالا، T_K دمای خنک‌کن و T_h دمای گرم‌کن در موتور استرلینگ برحسب کلویین است. با داشتن فشار، دما و حجم موتور و ثابت گاز، جرم کلی سیال عامل موتور برحسب گرم مطابق رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود [۱۷،۱۶].

$$P_{mean} = \frac{M.R}{S \cdot \sqrt{1-b^2}} \quad (36)$$

در معادله بالا، P_{mean} فشار متوسط موتور برحسب بار است. همچنین، با مشخص بودن حجم‌ها و جرم سیال عامل فشار کلی داخل موتور استرلینگ به دست می‌آید (رابطه (۳۷)) [۱۷،۱۶].

$$P = MR \left(\frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T_k} + \frac{V_r \ln(T_h/T_k)}{(T_h - T_k)} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_h} \right)^{-1} \quad (37)$$

دمای بازیاب موجود در داخل موتور، که محل عبور هوای سرد و گرم است، برحسب کلویین و با رابطه (۳۸) قابل محاسبه است [۱۷،۱۶].

$$T_r = \frac{T_h - T_k}{\ln\left(\frac{T_h}{T_k}\right)} \quad (38)$$

کار انجام‌شده در مرحله انبساط با W_e نشان داده می‌شود که برحسب ژول بر چرخه بوده و براساس فشار میانگین و فشارهای بیشینه و کمینه به دست می‌آید. کار انجام‌شده در مرحله تراکم نیز با W_c نشان داده می‌شود و کل کار انجام‌شده در یک چرخه با W_{st} نشان داده می‌شود که مجموع کار انجام‌شده در مرحله انبساط و تراکم بوده و طبق روابط (۳۹) تا (۴۱) محاسبه می‌شوند [۱۷،۱۶].

$$W_c = \pi V_{swc} P_{mean} \sin \beta (\sqrt{1-b^2} - 1) / b \quad (39)$$

$$W_e = \pi V_{swe} P_{mean} \sin(\beta - \alpha) (\sqrt{1-b^2} - 1) / b \quad (40)$$

$$W_{ST} = W_c + W_e \quad (41)$$

موتورهای استرلینگ نوع آلفا از نظر تولید توان به دو دسته موتور نوع آلفا با دو پیستون (ساده) و موتور نوع آلفا با چهار پیستون (موتور دوطرفه) تقسیم می‌شوند. در موتور استرلینگ نوع آلفای ساده توان خروجی کم بوده، در حالی که در موتور دوطرفه تعداد سیلندرها بیشتر بوده و به صورت سری در کنار هم قرار گرفته‌اند و توان تولیدی بیشتر است.

در این تحقیق، از موتور استرلینگ دوطرفه Ford 4-215 ساخت شرکت فورد استفاده شده است، که مشخصات آن در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. موتور استرلینگ دوطرفه از چهار پیستون تشکیل شده است که در آن پیستون‌ها به صورت متوالی در کنار هم قرار گرفته‌اند و بنا به توان مورد نیاز می‌توان تعداد سیلندرها و پیستون‌ها را زیاد کرد. بنابراین، این نوع موتور، به دلیل داشتن چهار پیستون که به صورت سری در کنار هم قرار دارند، دارای توان تولیدی بیشتر بوده و مقدار آن در حدود ۲۱۲/۹ کیلووات است [۱۸،۱۷].

جدول ۴- پارامترهای هندسی موتور استرلینگ Ford 4-215 [17]

Table 4- Geometric parameters of Ford 4-215 Stirling engine [17]

Piston		Cooler	
Clearance volumes compression space	214.2 cm ³	Number of cooler tube	742
Clearance volumes expansion space	214.2 cm ³	Cooler tube internal diameter	0.9 mm
Swept volumes compression space	870.6 cm ³	Cooler tube length	87 mm
Swept volumes expansion space	870.6 cm ³	Regenerator	
Total internal engine volume	670 cm ³	Regenerator diameter	73 mm
Cylinder internal diameter	73 mm	Regenerator length	34 mm
Piston stroke	52 mm	Regenerator matrix wire diameter	36 μm
Heater		Matrix mesh size	200
Number of heater tube	22	Matrix porosity	0.62
Heater tube internal diameter	4 mm	Number of regenerator units per cylinder	2
Heater tube length	462 mm		

جدول ۵- پارامترهای عملکردی موتور استرلینگ Ford 4-215 [17]

Table 5- Operational parameters of Ford 4-215 Stirling engine [17]

Gas	Hydrogen	Mean pressure	15 MPa
Hot space temperature (T _h)	1023 K	Total mass of gas	16.2 gr
Cold space temperature (T _k)	327 K	Speed	3300 rpm

سیستم ترکیبی

در این بخش، با در نظر گرفتن کل سیستم به عنوان یک حجم کنترل، بازده الکتریکی آن با استفاده از رابطه (۴۲) به دست خواهد آمد:

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (42)$$

در رابطه بالا، توان خالص خروجی از سیستم برابر توان خالص خروجی از میکروتوربین بوده و مقدار انرژی ورودی به سیستم نیز برابر انرژی آزاد شده ناشی از مصرف سوخت در محفظه احتراق است.

$$\dot{W}_{net} = (\dot{W}_{AC})_{gt} + (\dot{W}_{AC})_{sofc} + \dot{W}_{ST} - (\dot{W}_{C,a}) \quad (43)$$

$$(\dot{W}_{AC})_{gt} = (\dot{W}_{DC})_{gt} \times \eta_{inv,gen} \quad (44)$$

$$(\dot{W}_{DC})_{gt} = \dot{W}_{gt} \quad (45)$$

روش حل

با توجه به معادلات ذکر شده در بخش‌های قبلی، جهت تحلیل مسئله یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار EES نوشته شده است که روند آن مطابق فلوجارت‌های زیر است (شکل ۲ و ۳). در بخش اول این برنامه، اطلاعات ورودی سیستم هیبریدی شامل فشار کاری کمپرسور، دبی هوا، چگالی جریان، دمای گازهای ورودی به توربین، تعداد سل‌های پیل، حجم قسمت گرم‌کن موتور، حجم بازیاب، حجم قسمت خنک‌کن، دمای منبع خنک‌کن، زاویه میل‌لنگ، نوع سیال موتور، سرعت زاویه‌ای موتور و جرم سیال موتور وارد می‌شوند. حدس اولیه دمای پیل زده شده و با حدس اولیه دمای پیل معادلات الکتروشیمیایی و حرارتی همزمان حل می‌شود. در مرحله بعد، محاسبات سیستم هیبریدی مانند محاسبات کمپرسور، محاسبات توربین، محاسبات محفظه احتراق، محاسبات موتور استرلینگ و بازیاب انجام شده و نتایج مربوطه حاصل می‌شود.

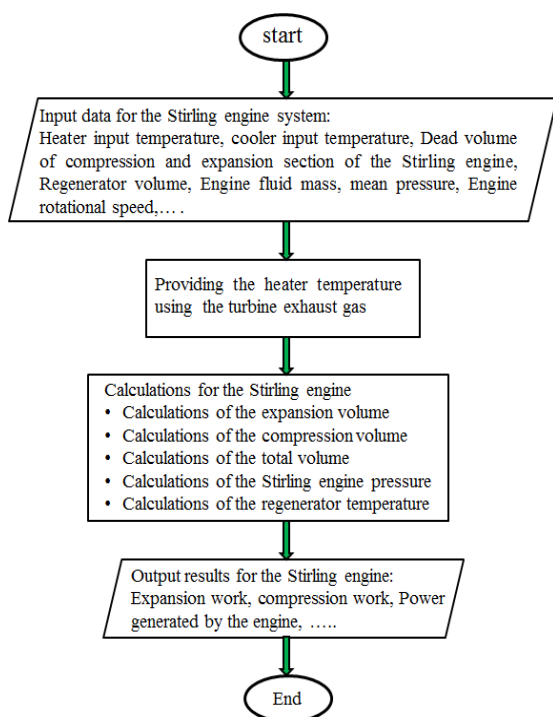


Figure 3- Flowchart of Stirling Engine modeling
شکل ۳- فلوجارت مدل سازی موتور استرلینگ

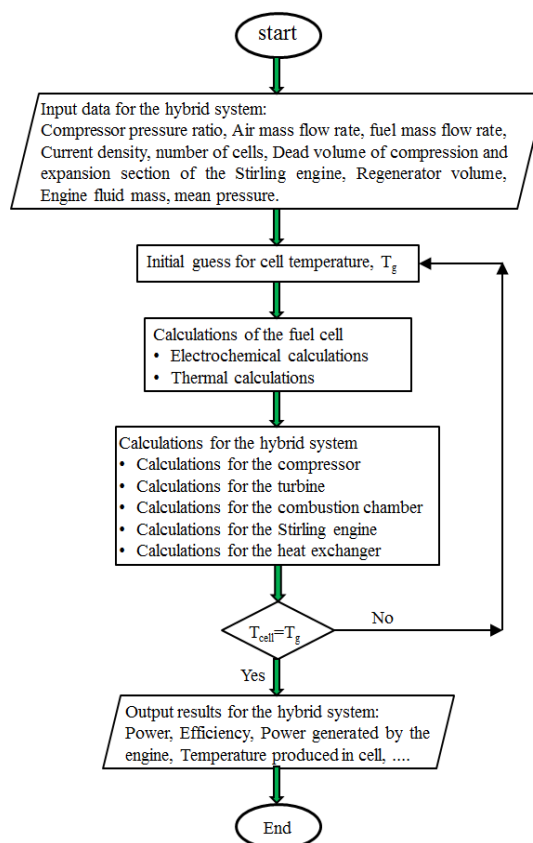


Figure 2- Flowchart of hybrid system modeling
شکل ۲- فلوجارت مدل سازی سیستم هیبریدی

اعتبارسنجی

با توجه به کمبود نتایج در مورد سیستم پیشنهادی، در این تحقیق اعتبارسنجی سیکل توربین گاز - پیل سوختی و همچنین موتور استرلینگ به صورت مجزا انجام شده است. به این صورت که ابتدا برای سیکل هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی برنامه مجزا نوشته شده و با نمونه مشابه مقایسه می شود. در مرحله بعد برنامه دیگری برای موتور استرلینگ نوع آلفا نوشته شده و با نمونه واقعی مقایسه شده و در نهایت این دو برنامه به صورت یک برنامه کامل با هم لینک شده و سیستم هیبریدی پیشنهادی تحلیل خواهد شد.

اعتبارسنجی سیکل هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی

جهت اعتبارسنجی برنامه تهیه شده، لازم است برای یک نمونه معین، نتایج حاصل از این برنامه تهیه شده با نتایج سایر مقالات موجود مقایسه شود. به منظور اعتبارسنجی کد تهیه شده برای سیکل هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی در این پژوهش، سیستم معرفی شده توسط چان و همکاران [۱۹]، مدل سازی شده و نتایج حاصل از کد حاضر برای پیل سوختی با نتایج تحقیقات آنها مقایسه شده است (جدول ۶). همخوانی نزدیک بین این نتایج، بیانگر صحت روش حاضر و کد تهیه شده است. در تحقیق انجام شده توسط چان و همکارانش، دما و چگالی جریان پیل به ترتیب ۱۱۶۶ کلوین و ۱۴۱۶ آمپر بر متر مربع در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- مقایسه نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج مرجع [۱۹]

Table 6- Comparison of the present model results with Ref. [19]

Parameter	Chan et al. [19]	Present work	Error (%)
Electrical efficiency (%)	62.2	60.52	2.7
Total efficiency (%)	83.8	80.62	3.79
Heat recovery (kW)	731	722.3	1.19
Power output (kW)	381	374.45	1.71
Cell voltage (V)	0.738	0.71	3.79
Current density (A/m ²)	1416	1416	-
Cell temperature (K)	1166	1166	-

اعتبارسنجی موتور استرلینگ

موتور استرلینگ استفاده شده در این تحقیق موتور Ford 4-215 است که توسط فلیپس دانشمند هلندی معرفی و بعدها توسط شرکت فورد توسعه داده شده و ساخته شد (شکل ۴). موتور استرلینگ به کار رفته در سیستم از نوع آلفای دوطرفه بوده که در آن پیستون‌ها به صورت سری در کنار هم قرار دارند که این مسئله باعث افزایش توان تولیدی سیستم می‌شود. به منظور اعتبارسنجی کد تهیه شده، موتور استرلینگ معرفی شده توسط یوریلی و همکاران [۱۶] مدل سازی شده و نتایج حاصل از کد حاضر در جدول ۷ با نتایج تحقیقات آن‌ها مقایسه شده است. همخوانی نزدیک بین این نتایج موید صحت روش حاضر و کد تهیه شده است. در این مدل سازی، دمای گرم کن ۱۰۲۳ کلوین، دمای خنک کن ۳۳۷ کلوین، فشار سیستم ۱۵۰ بار و سرعت زاویه‌ای موتور ۳۳۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از کد حاضر با نتایج مرجع [۱۷]

Table 7- Comparison of the present model results with Ref. [17]

Parameter	Urieli et al. [17]	Present work	Error (%)
Heat transferred to the cooler Q_k (J/cycle)	1901	1840	3.2
Heat transferred to the Heater Q_h (J/cycle)	5572	5485	1.56
Power output (kW)	212.9	207.88	2.4
Thermal efficiency (%)	67.1	66.08	1.52



Figure 4- Stirling engine Ford 4-215 [17]

شکل ۴- موتور استرلینگ Ford 4-215 [۱۷]

نتایج

در این قسمت، ابتدا عملکرد سیستم هیبریدی در یک شرایط مشخص و ثابت، که ویژگی‌های آن در جدول ۸ ارائه شده، بررسی شده و سپس به مطالعه پارامتری آن پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در سیستم هیبریدی پیشنهادی سهم پیل سوختی در تولید توان الکتریکی بیشتر از موتور استرلینگ و توربین گاز است.

جدول ۸- نتایج حاصل برای سیستم پیشنهادی در ورودی‌های مشخص

Table 8- The results for the proposed system in specific inputs

Input Parameter	Value	Output Parameter	Value
Air flow rate (kmol/h)	100	Fuel cell temperature (K)	1106
Inlet air pressure (bar)	1	Engine heater temperature (K)	985.5
Compressor pressure ratio	3	Engine regenerator temperature (K)	574.8
Number of cells	5760	Fuel cell power output (kW)	511
Fuel cell pressure (bar)	1	Gas turbine power output (kW)	212.2
Turbine inlet temperature (K)	1200	Stirling power output (kW)	207.9

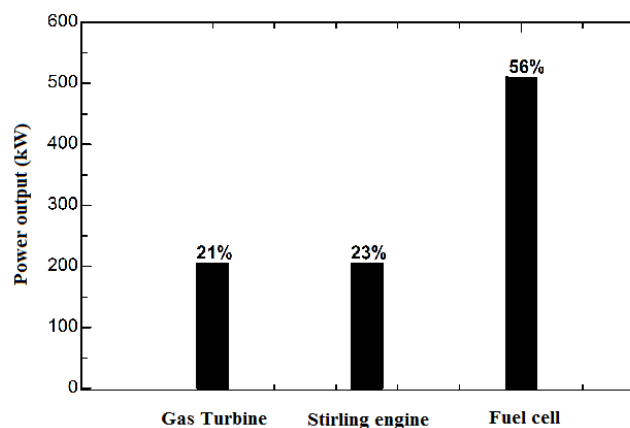


Figure 5- The share of each component of the hybrid system in electric power generation

شکل ۵- سهم هر کدام از اجزای سیستم هیبریدی در تولید توان الکتریکی

در این بخش، عملکرد سیستم هیبریدی پیشنهادی از دیدگاه ترمودینامیکی تحلیل و بررسی شده است. پارامترهای طراحی و متغیرهای تصمیم‌گیری در تحلیل این سیستم نسبت فشار کمپرسور، دمای گازهای ورودی به توربین، تعداد سل‌های به‌کار رفته در پیل، سیال عامل موتور استرلینگ و سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ انتخاب شده است. در بخش اول، اثر نسبت فشار کمپرسور و دمای گازهای ورودی به توربین بر روی عملکرد آن بررسی شده است. با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین، توان تولیدی در آن افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به اینکه دمای گازهای ورودی به توربین در میکروتوربین‌ها نمی‌تواند بسیار بالا باشد، در این تحقیق سه دمای ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سلسیوس انتخاب شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین توان تولیدی در موتور استرلینگ افزایش خواهد یافت (شکل ۶). از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت فشار کاری کمپرسور، نسبت انبساط در توربین نیز بیشتر شده و این مسئله سبب کاهش دمای گازهای خروجی از توربین می‌شود. با کاهش دمای گازهای خروجی از توربین مقدار گرمای ورودی به موتور استرلینگ کاهش می‌یابد. از آنجائیکه توان تولیدی موتور استرلینگ ایدئال تابع دو دمای منبع سرد و گرم است، با کاهش دمای منبع گرم توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد (شکل ۶).

دما و فشار کاری پیل سوختی نیز دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در بیان کارایی آن و همچنین سیستم هیبریدی اند. افزایش این دو پارامتر سبب بالارفتن کارایی پیل شده و عملکرد آن را بهبود می بخشد. در شکل ۷ مشاهده می شود که افزایش نسبت فشار کمپرسور سبب بالارفتن فشار کاری پیل شده و از سوی دیگر دمای کاری آن را پایین می آورد. با افزایش فشار کاری پیل، به دلیل افزایش تابع گیبس، توان تولیدی در آن بیشتر شده و از سوی دیگر، با کاهش دما نیز، ولتاژ تولیدی و توان خروجی از آن کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، نتایج نشان می دهد که با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین، دمای کاری پیل افزایش خواهد یافت.

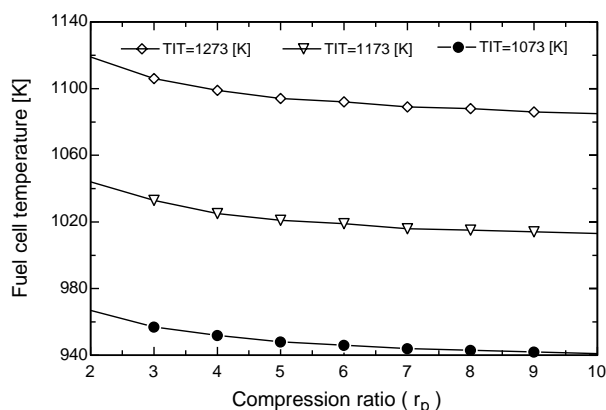


Figure 7- Effect of system compression ratio on fuel cell temperature

شکل ۷- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی دمای کاری پیل سوختی

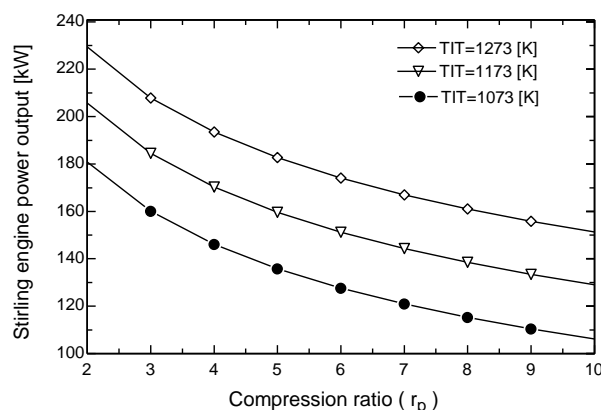


Figure 6- Effect of system compression ratio on Stirling engine power output

شکل ۶- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی توان خروجی موتور استرلینگ

در شکل ۸، نمودار تغییرات توان تولیدی در پیل سوختی نسبت به فشار کاری کمپرسور و دمای گازهای ورودی به توربین نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در شکل ۸ نشان می دهد که در نسبت فشارهای پایین افزایش فشار پیل بر کاهش دمای آن غالب بوده و توان تولیدی پیل افزایش خواهد یافت. در نسبت فشارهای بالا نیز نرخ تغییرات توان تولیدی پیل سوختی تقریباً ثابت خواهد ماند. شکل ۹ نیز نمودار تغییرات بازده الکتریکی موتور استرلینگ در نسبت فشارهای کاری مختلف کمپرسور را نشان می دهد. نتایج بیان گر این مسئله است که با افزایش نسبت فشار کمپرسور دمای گازهای خروجی از توربین کاهش یافته و گرمای کمتری به موتور استرلینگ خواهد رسید و چون عملکرد موتور استرلینگ تابع دمای خروجی از توربین است، با کاهش آن بازده الکتریکی موتور استرلینگ نیز کاهش می یابد. حداکثر بازده الکتریکی موتور استرلینگ در حدود ۷۲ درصد برآورد می شود. مشابه عملکرد سیستم هیبریدی این حداکثر بازده در نسبت فشار دو اتفاق خواهد افتاد. با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین به اندازه ۱۰۰ درجه سلسیوس، بازده موتور در حدود ۴ درصد بالا خواهد رفت. به دلیل عملکرد پیل سوختی بخشی از انرژی ورودی به آن به صورت حرارت وارد محیط می شود.

در شکل ۱۰، نمودار تغییرات توان خالص تولیدی سیستم هیبریدی نسبت به تغییر فشار کاری کمپرسور نشان داده شده است. نتایج بخش قبلی نشان داد که با افزایش نسبت فشار کمپرسور توان تولیدی در پیل افزایش و سپس مقدار ثابتی به خود خواهد گرفت. از سوی دیگر، در موتور استرلینگ نیز با افزایش نسبت فشار توان تولیدی، به دلیل کاهش دمای گازهای خروجی از توربین، کاهش خواهد یافت. این مسئله در مورد توربین گاز نیز وجود داشته و با افزایش نسبت فشار توان تولیدی آن ابتدا افزایش و سپس، به دلیل مصرف بالای کمپرسور، سیر نزولی به خود خواهد گرفت. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، با افزایش فشار کاری کمپرسور کار خالص تولیدشده در سیستم هیبریدی تا یک حد معین افزایش پیدا کرده و در نسبت فشارهای بالا نرخ نزولی به خود خواهد گرفت. این مسئله، با توجه به رفتار سه جزء تولیدکننده توان، کاملاً منطقی به نظر

می‌رسد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که بالا بردن دمای گازهای ورودی به توربین، همواره باعث بهبود عملکرد سیستم هیبریدی و پیل سوختی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که برای سیستم هیبریدی پیشنهادی محدوده فشار ۳ تا ۶ بار یک بازه مناسب است.

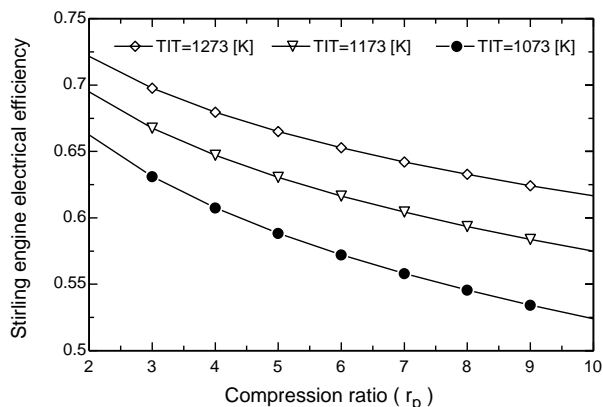


Figure 9- Effect of system compression ratio on Stirling engine electrical efficiency

شکل ۹- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی بازده الکتریکی موتور استرلینگ

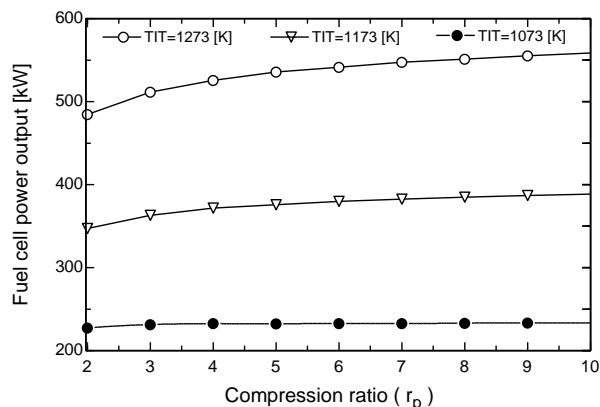


Figure 8- Effect of system compression ratio on Fuel Cell power output

شکل ۸ اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی توان تولیدی پیل سوختی

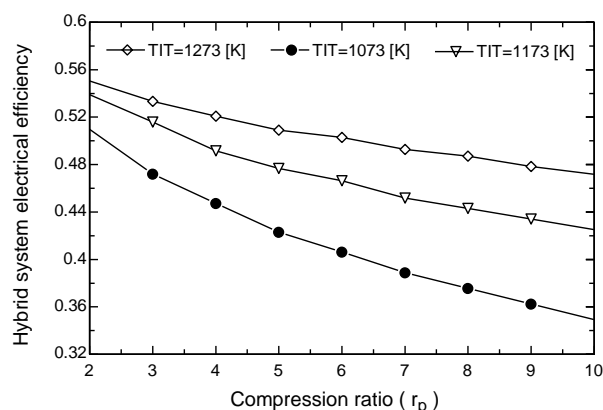


Figure 11- Effect of system compression ratio on hybrid system electrical efficiency

شکل ۱۱- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی راندمان الکتریکی سیستم هیبریدی

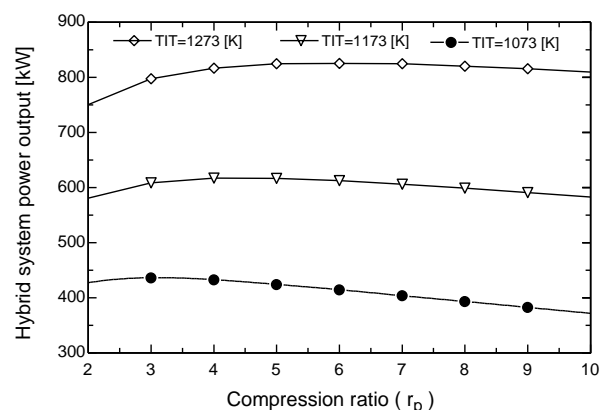


Figure 10- Effect of system compression ratio on hybrid system power output

شکل ۱۰- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی توان خالص تولیدی سیستم هیبریدی

در شکل ۱۱ نیز تغییرات بازده الکتریکی سیستم هیبریدی در نسبت فشارهای کاری مختلف کمپرسور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت فشار کمپرسور، به دلیل کاهش توان تولیدی، بازده الکتریکی سیستم نیز کاهش خواهد یافت. دلیل کاهش بازده الکتریکی سیستم در نسبت فشارهای بالاتر افزایش کار مصرفی کمپرسور، کاهش کار تولیدی موتور استرلینگ و ثابت ماندن توان تولیدی در پیل سوختی است. از طرفی، نتایج بیانگر این است که با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین بازده الکتریکی سیستم افزایش خواهد یافت. نتایج نشان می‌دهد که شیب کاهش بازده الکتریکی سیستم در دماهای بالا برای گازهای ورودی به توربین کمتر است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در دمای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس برای گازهای ورودی به توربین، بازده الکتریکی سیستم در کمترین نسبت فشار کاری سیستم (حدود دو بار) در حدود ۵۵ درصد است.

گرمای تلف شده در پیل سوختی یکی دیگر از تلفات حرارتی موجود در سیستم هیبریدی است. بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می دهد که نزدیک به ۵۰ درصد از انرژی حرارتی تولید شده در پیل از طریق بدنه آن تلف می شود. با توجه به این مسئله، در صورت کنترل این حرارت می توان بازده کلی سیستم را افزایش داد. در شکل ۱۲، تغییرات گرمای تولید شده در پیل سوختی در نسبت فشارهای کاری مختلف نشان داده شده است. افزایش نسبت فشار در سیستم سبب افزایش چگالی جریان در پیل شده و این مسئله سبب افزایش فعل وانفعالات شیمیایی در آن می شود. این مسئله به نوبه خود سبب بالارفتن حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. همان طور که مشاهده می شود، افزایش دمای گازهای ورودی به توربین نیز باعث افزایش دمای کاری پیل شده و این مسئله سبب افزایش حرارت تولیدی در آن خواهد شد. با توجه به اینکه نزدیک به ۵۰ درصد از توان تولیدی در سیستم هیبریدی توسط بخش پیل سوختی تامین می شود، در این بخش، برای بررسی بیشتر سیستم محاسبات ولتاژ پیل سوختی ارائه شده است. در شکل ۱۳، ولتاژ تولیدی پیل در شرایط مختلف کاری نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، با افزایش نسبت فشار کاری کمپرسور، به دلیل کاهش دمای کاری پیل و افزایش افت ولتاژهای تولید شده در آن، ولتاژ خالص تولیدی سیر نزولی به خود خواهد گرفت. از سوی دیگر، همان طور که پیش بینی می شود، افزایش دمای گازهای ورودی به توربین سبب بالارفتن ولتاژ تولیدی در آن خواهد شد. همچنین، در شکل ۱۴، مقایسه بین افت ولتاژهای فعال سازی، اهمی و غلظتی در یک چگالی جریان مشخص صورت گرفته است.

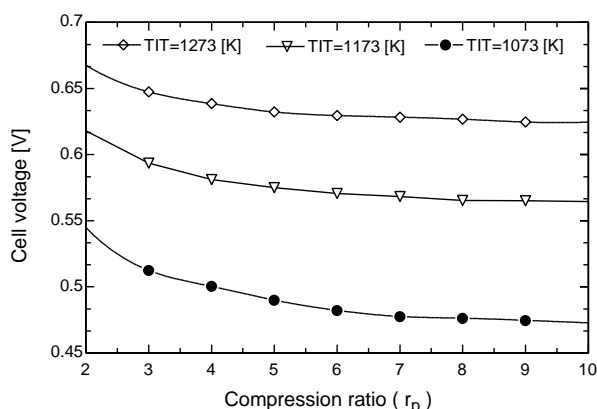


Figure 13- Effect of system compression ratio on cell voltage

شکل ۱۳- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی ولتاژ واقعی پیل سوختی

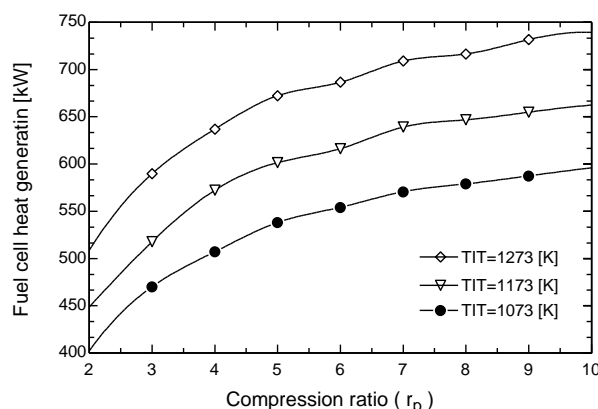


Figure 12- Effect of system compression ratio on fuel cell heat generation

شکل ۱۲- اثر نسبت فشار کمپرسور بر روی گرمای تولید شده در پیل سوختی

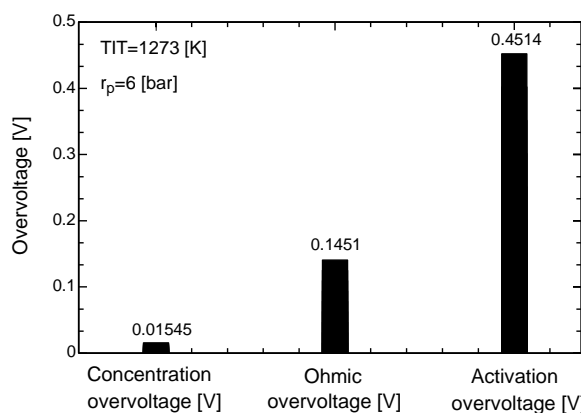


Figure 14- Comparison of the fuel cell over voltage changes in the current density of 2500 (A/m²)

شکل ۱۴- مقایسه افت ولتاژهای پیل سوختی در چگالی جریان ۲۵۰۰ آمپر بر مترمربع

همان طور که مشاهده می شود، میزان افت ولتاژ فعال سازی در مقایسه با سایر افت ولتاژهای اهمی و غلظتی بیشترین مقدار را در پیل دارد. مطابق شکل ۱۴، بعد از افت ولتاژ فعال سازی، افت ولتاژ اهمی بیشترین سهم را در مقدار تلفات ولتاژ پیل سوختی داراست. نتایج نشان می دهد که در میان سه افت اشاره شده، افت ولتاژ غلظتی کمترین مقدار افت ولتاژ را دارا بوده و در محاسبات ولتاژ پیل قابل چشم پوشی است.

در این بخش، اثرات تعداد سل های پیل سوختی بر روی عملکرد سیستم هیبریدی بررسی شده است. در شکل های ۱۵ و ۱۶، نمودار تغییرات توان تولیدی و بازده الکتریکی سیستم هیبریدی در تعداد سل های مختلف نشان داده شده است. در این بخش، نسبت فشار سیستم ۶ بار و دمای گازهای ورودی به توربین ۱۰۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. نتایج بیانگر این مسئله است که در یک چگالی جریان ثابت افزایش تعداد سل ها باعث افزایش بازده الکتریکی و توان الکتریکی خالص در سیستم هیبریدی خواهد شد. نکته مهمی که باید در این حالت در نظر گرفته شود مسئله قیمت سیستم هیبریدی است. افزایش تعداد سل ها از یک سو سبب بالارفتن بازده و توان تولیدی در سیستم شده و از سوی دیگر افزایش قیمت ناشی از تعداد سل ها را در بر خواهد داشت.

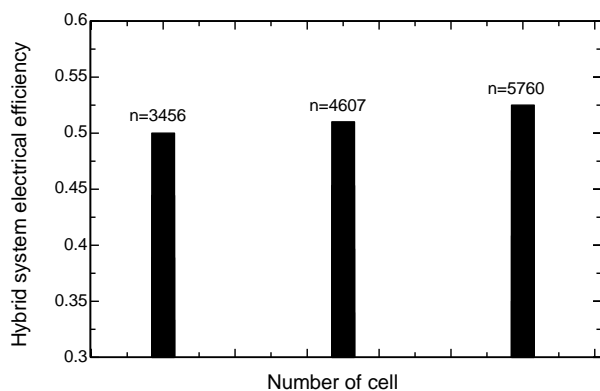


Figure 16- Comparison of the hybrid system electrical efficiency with number of cell

شکل ۱۶- مقایسه راندمان الکتریکی سیستم هیبریدی با تعداد سل های مختلف

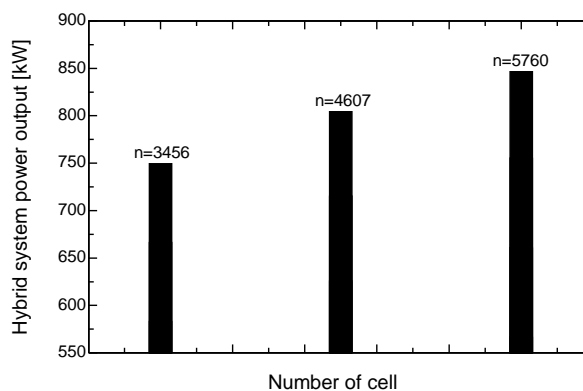


Figure 15- Comparison of the hybrid system power output with number of cell

شکل ۱۵- مقایسه توان تولیدی سیستم هیبریدی با تعداد سل های مختلف

در شکل های ۱۷ تا ۱۹، تأثیر سرعت زاویه ای (فرکانس) موتور استرلینگ بر روی توان تولیدی موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی و همچنین بازده کلی آن نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۷ مشاهده می شود، با افزایش فرکانس موتور استرلینگ دور موتور بیشتر شده و با سرعت بیشتری چرخ لنگر^۳ را می چرخاند و در نتیجه توان تولیدی موتور نیز افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، با افزایش فرکانس موتور استرلینگ، توان تولیدی موتور استرلینگ افزایش یافته و این مسئله باعث افزایش توان تولیدی کل سیستم هیبریدی می شود. همچنین، با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین توان تولیدی توسط توربین و موتور استرلینگ بیشتر شده و این مسئله موجب افزایش توان تولیدی سیستم هیبریدی خواهد شد. همان طور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود، با افزایش فرکانس موتور استرلینگ، بازده کلی سیستم با یک شیب تند افزایش می یابد. همچنین، همانند دو حالت قبل، با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین، بازده کلی سیستم نیز افزایش می یابد. افزایش توان تولیدی سیستم هیبریدی باعث افزایش بازده می شود.

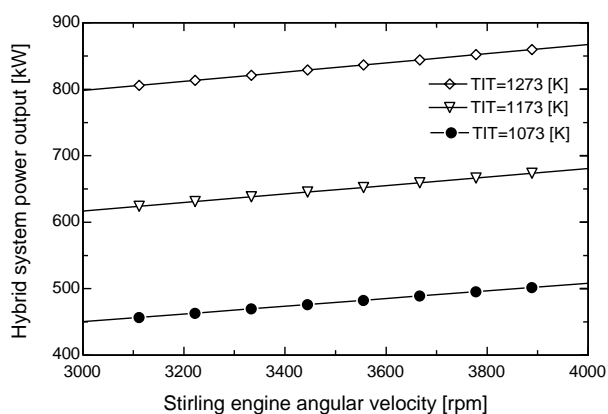


Figure 18- Effect of Stirling engine angular velocity on hybrid system power output

شکل ۱۸- اثر سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ بر روی توان تولیدی سیستم هیبریدی

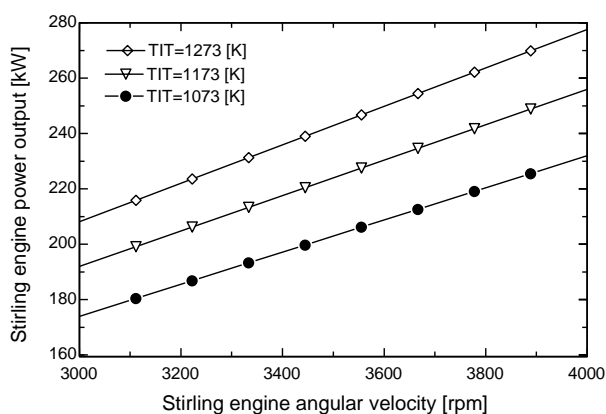


Figure 17- Effect of Stirling engine angular velocity on Stirling engine power output

شکل ۱۷- اثر سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ بر روی توان تولیدی موتور استرلینگ

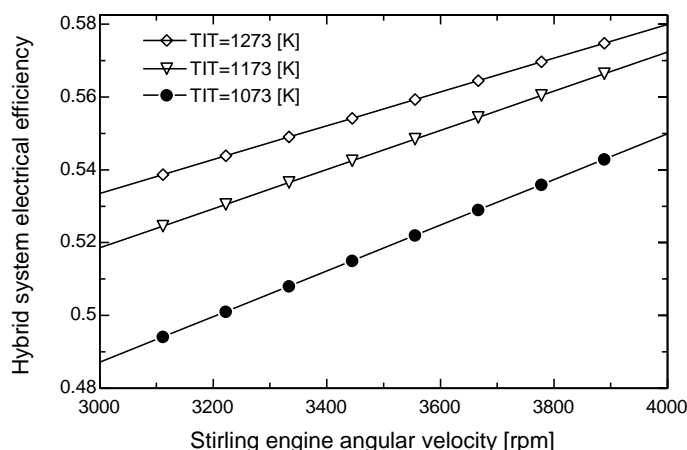


Figure 19- Effect of Stirling engine angular velocity on hybrid system electrical efficiency
شکل ۱۹- اثر سرعت زاویه‌ای موتور استرلینگ بر روی راندمان الکتریکی سیستم هیبریدی

در ادامه، اثر نوع سیال مورد استفاده در موتور استرلینگ بر روی عملکرد موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی بررسی شده است. سیال مورد استفاده در موتور استرلینگ هیدروژن است که در این بخش از هوا و هلیوم نیز، به‌عنوان دو سیال عامل دیگر، استفاده شده است. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، به‌خوبی دیده می‌شود که در صورت استفاده از هلیوم، به‌جای هیدروژن و هوا به‌عنوان سیال عامل در موتور استرلینگ، توان تولیدی موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی بیشتر خواهد شد. استفاده از گاز هیدروژن باعث کم‌شدن حرارت ورودی به موتور شده و در نتیجه مقادیر حرارت بازبازی شده در بازتاب موتور نیز کاهش می‌یابد (شکل ۲۰). همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، زمانی که از هلیوم به‌عنوان سیال عامل در موتور استرلینگ استفاده می‌شود، توان تولیدی موتور بیشترین مقدار بوده که این مسئله باعث افزایش توان تولیدی سیستم نیز خواهد شد. این مسئله در مورد کل سیستم هیبریدی نیز صادق است (شکل ۲۱).

براساس نتایج به‌دست آمده، با اضافه‌شدن موتور استرلینگ به سیستم دوگانه توربین گاز و پیل سوختی توان تولیدی و بازده الکتریکی سیستم افزایش می‌یابد. در این بخش، مقایسه‌ای بین چرخه ساده توربین گاز، سیکل هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی و همچنین سیستم پیشنهادی سه‌گانه انجام شده است (شکل‌های ۲۲ و ۲۳). براساس مقایسه انجام‌شده، توان

تولیدی سیستم پیشنهادی در حدود سه برابر توان تولیدی چرخه ساده توربین گاز و $1/3$ برابر توان تولیدی سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی است. از سوی دیگر، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بازده الکتریکی سیستم پیشنهادی در حدود ۸۲ درصد است. این در حالی است که بازده سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی در حدود ۵۰ درصد و چرخه ساده توربین گاز ۳۰ درصد است. در مقایسه صورت گرفته، شرایط کاری هر سه سیستم یکسان فرض شده است.

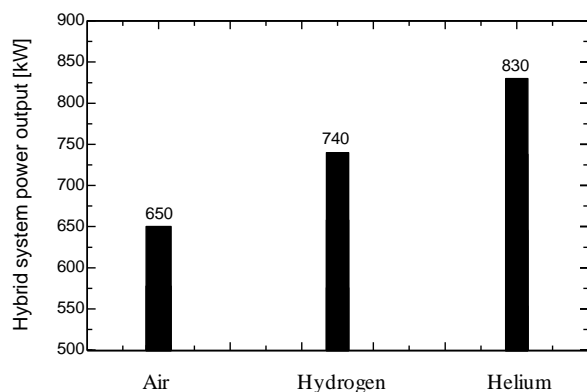


Figure 21- Comparison of hybrid system power output with different working fluids

شکل ۲۱- مقایسه توان خالص تولیدی سیستم هیبریدی با سیال عامل‌های مختلف

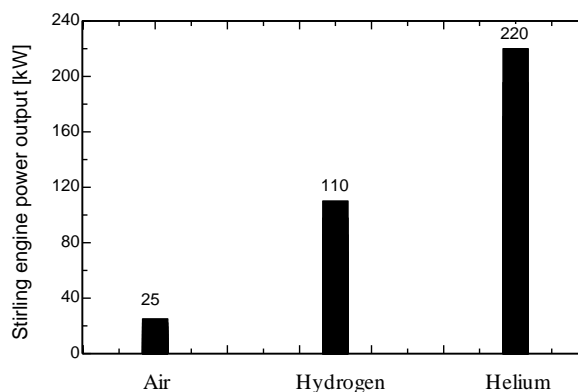


Figure 20- Comparison of Stirling engine power output with different working fluids

شکل ۲۰- مقایسه توان تولیدی موتور استرلینگ با سیال عامل‌های مختلف

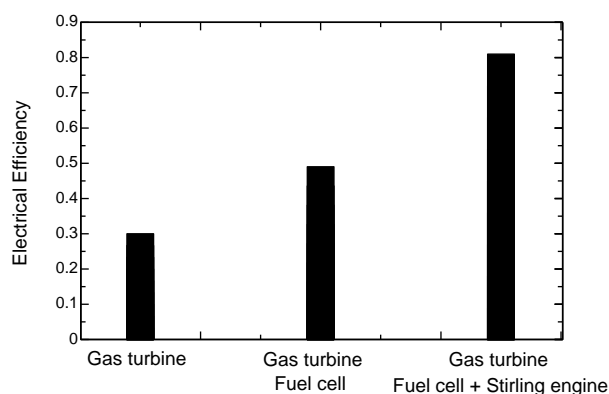


Figure 23- Comparison of the system electrical efficiency in three different cases

شکل ۲۳- مقایسه بازده الکتریکی سیستم در سه حالت مختلف

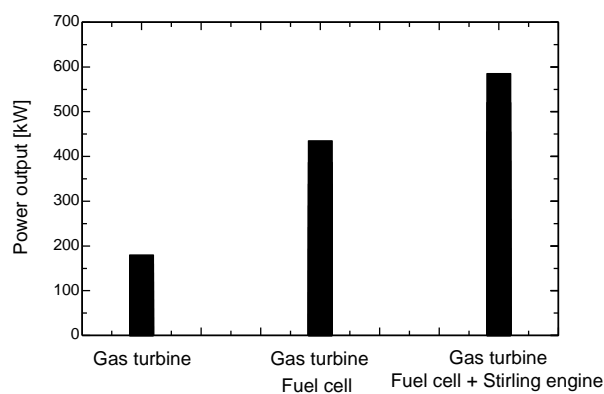


Figure 22- Comparison of the system net power output in three different cases

شکل ۲۲- مقایسه توان خالص تولیدی سیستم در سه حالت مختلف

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله، می‌توان موارد زیر را به عنوان جمع‌بندی بحث ارائه کرد:

- با افزایش نسبت فشار کاری کمپرسور، نسبت انبساط در توربین بیشتر شده و این مسئله سبب کاهش دمای گازهای خروجی از توربین می‌شود. با کاهش دمای گازهای خروجی از توربین، مقدار گرمای ورودی به موتور استرلینگ کاهش می‌یابد. از آنجایی که توان تولیدی موتور استرلینگ ایدئال تابع دو دمای منبع سرد و گرم است، با کاهش دمای منبع گرم توان تولیدی موتور و بازده الکتریکی آن کاهش می‌یابد.

- حداکثر بازده الکتریکی موتور استرلینگ در حدود ۷۲ درصد برآورد می‌شود. این حداکثر بازده در نسبت فشار دو اتفاق خواهد افتاد. با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین به اندازه ۱۰۰ درجه سلسیوس، بازده موتور در حدود ۴ درصد بالا خواهد رفت.
- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای گازهای ورودی به توربین توان تولیدی در موتور استرلینگ افزایش خواهد یافت.
- افزایش نسبت فشار کمپرسور سبب بالا رفتن فشار کاری پیل شده و از سوی دیگر دمای کاری آن را پایین می‌آورد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در نسبت فشارهای پایین جمله افزایش فشار پیل بر کاهش دمای آن غالب بوده و توان تولیدی پیل افزایش خواهد یافت. در نسبت فشارهای بالا نیز نرخ تغییرات توان تولیدی پیل سوختی تقریباً ثابت خواهد ماند.
- با افزایش فشار کاری کمپرسور کار خالص تولیدشده در سیستم هیبریدی تا یک حد معین افزایش پیدا کرده و در نسبت فشارهای بالا نرخ نزولی به خود خواهد گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بالا بردن دمای گازهای ورودی به توربین همواره باعث بهبود عملکرد سیستم هیبریدی و پیل سوختی می‌شود. برای سیستم هیبریدی پیشنهادی محدوده فشار ۳ تا ۶ بار یک بازه مناسب است.
- با افزایش نسبت فشار کمپرسور، به دلیل کاهش توان تولیدی، بازده الکتریکی سیستم نیز کاهش خواهد یافت. دلیل کاهش بازده الکتریکی سیستم در نسبت فشارهای بالاتر، افزایش کار مصرفی کمپرسور، کاهش کار تولیدی موتور استرلینگ و ثابت ماندن توان تولیدی در پیل سوختی است.
- افزایش نسبت فشار در سیستم سبب افزایش چگالی جریان در پیل شده و این مسئله سبب افزایش فعل و انفعالات شیمیایی در آن می‌شود. این مسئله؛ به نوبه خود، سبب بالا رفتن حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در صورت کنترل حرارت تولیدشده در پیل و استفاده مفید از آن بازده کلی سیستم هیبریدی قابل افزایش نیز خواهد بود.
- در یک چگالی جریان ثابت، افزایش تعداد سل‌ها باعث افزایش بازده الکتریکی و توان الکتریکی خالص در سیستم هیبریدی خواهد شد.
- با افزایش فرکانس موتور استرلینگ، توان تولیدی موتور استرلینگ افزایش یافته و این مسئله باعث افزایش توان تولیدی کل سیستم هیبریدی می‌شود. با افزایش فرکانس موتور استرلینگ، بازده کلی سیستم با یک شیب تند افزایش می‌یابد.
- در صورت استفاده از هلیوم به جای هیدروژن و هوا به عنوان سیال عامل در موتور استرلینگ، توان تولیدی موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی بیشتر می‌شود.
- براساس مقایسه انجام شده توان تولیدی سیستم پیشنهادی در حدود سه برابر توان تولیدی چرخه ساده توربین گاز و ۱/۳ برابر توان تولیدی سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بازده الکتریکی سیستم پیشنهادی در حدود ۸۲ درصد بوده و این در حالی است که بازده سیستم هیبریدی توربین گاز و پیل سوختی در حدود ۵۰ درصد و چرخه ساده توربین گاز ۳۰ درصد است.

منابع

1. M. C. Williams, *Fuel cell handbook*, EG&G Technical Services, Inc., West Virginia, 2004.
2. J. Pirkandi, M. Ghasemi and M. H. Hamed, "Thermodynamic Performance Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell and Micro Gas Turbine Hybrid Cycle in a CHP System," *Journal of Fuel and Combustion*, 4, No. 2, 2011, pp. 66-89. (in Persian)
3. M. Ziabasharhagh, and M. Mahmoodi, "Numerical Solution of Beta-type Stirling Engine by Optimizing Heat Regenerator for Increasing Output Power and Efficiency," *Journal of Mechanical Engineering*, 13, No. 2, 2011, pp. 77-103. (in Persian)
4. G. Schmidt, *The Theory of Lehmann's Calorimetric Machine*, Denmark University, Z. Vereines Deutcher Ingenieure, 15, part 1, 1871.

5. A. Poullikkas, "An Overview of Current and Future Sustainable Gas Turbine Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 2005, pp. 409-443.
6. C. B. Muñoz, *Analysis of Hybrid Sofc-Stirling Engine Plants*, Master Thesis, Thermal Energy Systems, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, February 2011.
7. Liwei Chen, Houcheng Zhang, Songhua Gao and Huixian Yan, "Performance Optimum Analysis of an Irreversible Molten Carbonate Fuel Cell Stirling Heat Engine Hybrid System," *Energy*, 64, 2014, pp. 923-930.
8. Masoud Rokni, "Biomass Gasification Integrated with a Solid Oxide Fuel Cell and Stirling Engine," *Energy*, 54, 2014, pp. 1-13.
9. A. Volkan Akkaya, "Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC," *International Journal of Energy Research*, 31, No. 1, 2007, pp. 79-98.
10. P. Ghanbari Bavarsad, "Energy and Exergy Analysis of Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System," *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, No. 17, 2007, pp. 4591-4599.
11. A. Ciesar, "Hybrid Systems Development by the Siemens Westinghouse Power Corporation," US Department of Energy, *Natural Gas Renewable Energy Hybrids Workshop*, Canada, August 2001.
12. Y. Haseli, I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic Modeling of a Gas Turbine Cycle Combined With a Solid Oxide Fuel Cell," *Journal of Hydrogen Energy*, 33, No. 20, 2008, pp. 5811-5822.
13. Y. Haseli, I. Dincer and G. F. Naterer, "Thermodynamic Analysis of a Combined Gas Turbine Power System with a Solid Oxide Fuel Cell through Exergy," *Journal of Thermochimica Acta*, 480, No. 1, 2008, pp. 1-9.
14. N. C. J. Chen and F. P. Griffin, *A Review of Stirling Engine Mathematical Models*, OAK Ridge National Laboratory, ORNL/CON-135, August, 1983.
15. R. C. Tew, *Computer Program for Stirling Engine Performance Calculations*, National Aeronautics a Lewis Research Center, DOE/NASA/51040-42, Ohio, January 1983.
16. W. R. Martini, *Stirling Engine Design Manual*, National Aeronautics a Lewis Research Center, DOE/NASA/3152-78/1, Ohio, April, 1978.
17. I. Urieli, D.M.Berchowitz, *Stirling Cycle Engine Analysis*, Oxford University Press, Oxford, 1984.
18. W. D. Ernst, R. K. Shaltens, *Automotive Stirling Engine Development Project*, University of Washington, Springer, New York, 1997.
19. S. H. Chan, H. K. Ho and Y. Tian, "Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant," *Journal of Power Sources*, 109, No. 1, 2002, pp. 111-120.

English Abstract

Performance Modeling and Analysis of Stirling Engine, Gas Turbine and Fuel Cell Hybrid Cycle for Application in a CHP System

Jamasb Pirkandi, Mehran Nosratollahi and Shahram Khodaparast

Department of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2015.7.9, Received in revised form: 2016.1.4, Accepted: 2016.1.11)

In this paper, performance of a gas turbine cycle equipped with a solid oxide fuel cell and Stirling engine is discussed from thermodynamic viewpoint. A thermodynamic analysis is performed for all components of the cycle, and a separate electrochemical and thermal analysis is conducted for the utilized fuel cells. With parametric study of the hybrid system, the influences of compressor pressure ratio, turbine inlet gas temperature, the number of cells, the type of fluid used in the Stirling engine, and the angular velocity of the Stirling engine on efficiency and power of the hybrid system are investigated. Based on the presented comparison, generated power of the proposed system is about three times larger than the simple gas turbine cycle and 1.3 times larger than the power produced by a hybrid gas turbine and fuel cell system. The obtained results show that the electrical efficiency of the proposed system is about 82 percent, while the fuel cell and gas turbine hybrid system and simple gas turbine cycle efficiencies are about 50 percent and 30 percent, respectively.

Keywords: Stirling Engine, Solid Oxide Fuel Cell, Gas Turbines, Hybrid System