

## بهینه‌سازی سیکل توربین گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامدلوهای با استفاده از الگوریتم بهینه هیبریدی بر پایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک

هامون پورمیرزاقا

گروه مکانیک و هوافضا، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران.

Hamoon.pourmirzaagha@iau.ac.ir

در این مقاله بهینه‌سازی سیکل توربین گاز مجهز به پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با سوخت هیدروژن با بکارگیری یک الگوریتم بهینه هیبریدی پیشنهادی برپایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک پرداخته شده است. ابتدا کلیه اجزای سیکل ترکیبی، جداگانه به کمک روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و برای پیل‌سوختی یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا انجام شده است. نتایج حاضر با نتایج مراجع معتبر مقایسه شده و مطابقت خوبی مشاهده شده است. همچنین یک تحلیل پارامتریک به منظور یافتن پارامترهای تاثیرگذار در سیکل انجام گرفته است. در ادامه جهت بهینه‌سازی یک الگوریتم پیشنهادی با استفاده از یک سری ایده، ارائه شده است؛ به این صورت، زمانی که الگوریتم ژنتیک نقاط بهینه را پیدا نمود، الگوریتم سیمپلکس درون این نقاط شروع به جستجوی بهترین نقطه بهینه محلی می‌نماید که در این حین منجر به ایجاد محلی‌سازی نواحی امیدوار که احتمال حضور نقطه بهینه کلی در آن است، می‌شود. برای ارزیابی الگوریتم مذکور از دیدگاه دقت، بر روی چندین تابع محک پیاده‌سازی شده و عملکرد آن با الگوریتم‌های بهینه‌ساز دیگر مقایسه شده است که دقت بالاتر الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، برای سه تابع هدف (راندمان حرارتی، راندمان اگزرسی و توان خالص) نمودار پرتو رسم شده است. نتایج بهینه‌سازی سیکل ترکیبی نشان می‌دهد که مناسب‌ترین نقطه در جبهه پرتو دارای راندمان ۶۰٪ است در حالی که توان خالص سیستم به میزان ۷۶٪ نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد.

تاریخ دریافت:  
۱۴۰۳/۴/۳

تاریخ پذیرش:  
۱۴۰۴/۶/۱۵

کلمات کلیدی:  
الگوریتم هیبریدی  
الگوریتم سیمپلکس-  
ژنتیک  
توربین گاز  
پیل سوختی اکسید جامد

## ۱. مقدمه

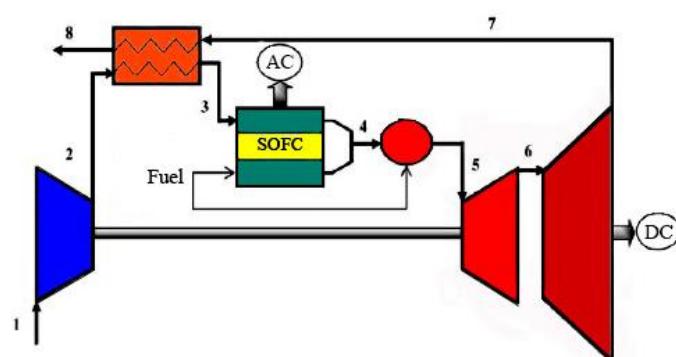
افزایش راندمان و بیبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است [۱-۳]. با توجه به روند روبرو شد مصرف انرژی در جهان استفاده از روشنها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندگی پایین‌تر در اولویت قرار گرفته است. امروزه، باگسترش سیستم‌های مختلف تولید انرژی، روش‌های گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل ژنراتورها مورد توجه قرار گرفته‌اند که هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خودند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم هزینه و همیشه در دسترس استفاده از پیل‌های سوختی را به عنوان یک کاندیدای مهم معرفی کرده است. پیل سوختی، یک دستگاه الکتروشیمیایی است که طی واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته و گرمای تولید می‌کند. پیل سوختی، نسبتاً آرام و بی‌صداست، به همین دلیل جهت تولید برق محلی مناسب می‌باشد [۴]. همچنین پیل سوختی به عنوان یک فناوری نوین برای تولید توان در توربین‌های گازی به کار گرفته و باعث افزایش بازده تا ۶۰٪ می‌شود، در حالی که در توربین‌های گازی معمولی، به علت تلفات زیاد در محافظه احتراق، بازده در حدود ۳۰٪ تا ۳۵٪ است. از میان انواع پیل سوختی، نوع اکسید جامد به دلیل راندمان بالا، آسودگی کم، تنوع سوخت مصرفی و از همه مهم‌تر دمای بالای گاز خروجی، بهترین گرینه برای استفاده در توربین گازی به شمار می‌رود. به همین دلیل در سال‌های اخیر، این تکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵]. گرچه تحقیقات در زمینه پیل سوختی اکسید جامد از اواخر دهه ۵۰ میلادی آغاز گردید، ولی نتایج یک مدل ساده پیل سوختی اکسید جامد در اواسط دهه ۸۰ منتشر شد؛ لذا اولین مقالات در زمینه سیستم‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد به اوایل دهه ۹۰ بر می‌گردد. مفهوم به کار گیری توربین گاز در کنار پیل سوختی، سال‌هاست که شناخته شده و تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک بر روی آن انجام شده است. در سال ۲۰۰۰، ماسارادو و لوبلی [۶] یک مطالعه مفهومی درباره بررسی عملکرد سیکل ترکیبی انجام دادند. مدل ریاضی ارائه شده تو سط آن‌ها، عملکرد پیل را در حالت یکنواخت و پایدار شبیه سازی می‌کرد. کاستامگنا و همکاران [۷]، طراحی و عملکرد سیستمی مشکل از میکروتوربین گاز با بازیاب حرارتی و پیل سوختی اکسید جامد دما بالا را مورد آزمایش قرار دادند. یانگ و همکاران [۸] دو سیستم با به سازی سوخت به صورت داخلی و خارجی در نظر گرفتند و تأثیر محدودیت در اختلاف دمای استک پیل سوختی را بر عملکرد آن‌ها بررسی کردند. پارک و همکاران [۹]، مشخصات طراحی و عملکرد یک سیستم ترکیبی را با در نظر گرفتن یک توربین گاز مشخص بررسی کردند. در بیشتر تحقیقات مذکور، عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی و توربین گاز با توجه به قانون اول ترمودینامیک بررسی شده است. همچنین کارهای گوناگون دیگری با در نظر گرفتن قانون دوم ترمودینامیک بر روی این سیستم انجام شده که به بر سی قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم و هر یک از اجزای آن می‌پردازد و نرخ برگشت‌ناپذیری را در اجزاء سیستم بررسی می‌کند. آنالیز اگررژی، یک تکنیک برای طراحی بهتر و بهبود آنالیز سیستم‌های انرژی است [۱۰]. این روش از قانون دوم ترمودینامیک و بقای جرم و انرژی بطور هم‌زمان استفاده می‌کند. کالیس و همکارانش [۱۱ و ۱۲] به بر سی و تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک یک سیکل توربین گاز ترکیبی با پیل سوختی اکسید جامد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیشترین نرخ نابودی اگررژی در پیل سوختی رخ می‌دهد. این نرخ نابودی اگررژی بالا به خاطر راندمان پایین واکنش شیمیایی است که در پیل سوختی رخ می‌دهد. با وجود راندمان بالای الکتریکی پیل سوختی، بیشترین نرخ نابودی اگررژی در پیل سوختی است که بخاطر تعداد زیاد واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی است. به طور مشابه محفظه احتراق نیز به خاطر انجام واکنش شیمیایی نرخ بالای نابودی اگررژی را دارد. همچنین نتایج نشان داد که نرخ نابودی اگررژی توربین و کمپرسور بخاطر راندمان بالا و نرخ کم انرژی جریان در این اجزا بسیار کم است. پیشنهاد آن‌ها این بود که در طراحی و کنترل سیستم‌های هیبریدی، باید نگاه اصلی بر روی اجزایی باشد که بالاترین نرخ گرانو سکی و همکارانش [۱۳] نیز به بر سی عملکرد اگررژی سیکل ترکیبی پرداختند. آن‌ها نیز مشابه کالیس نشان دادند که بالاترین نرخ نابودی اگررژی به ترتیب در پیل سوختی و محفظه احتراق است. اما در مدل آنها اختلاف نرخ نابودی اگررژی‌بین محفظه احتراق و پیل سوختی کمتر از ۰.۵٪ است. صادق مطهر و علی اکبر عالم رجبی [۱۴] به بر سی آنالیز اگررژی یک سیستم هیبریدی همراه با تزریق بخار پرداختند. در تحقیق آن‌ها، از گاز خروجی از توربین برای گرم کردن و ایجاد بخار استفاده شده است. نوربخش و همکاران [۱۵] یک سیستم چندتولیدی مبتنی بر گازی سازی سوخت‌های سنگین طراحی کردند. این سیستم با ترکیب چرخه‌های پیشرفته مانند پیل سوختی، به طور

همزمان برق، سرمایش، آب گرم، هیدروژن، آب شیرین و نیتروژن تولید می‌کند. در تحقیق آنها تحلیل انرژی، اگررژی، اقتصادی انجام شده است.

لی و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی راندمان‌های انرژی و اگررژی در یک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی هوای فشرده با استفاده از الگوریتم فرابتکاری پرداختند. اثر پارامترهایی مانند چگالی جریان، دما بر عملکرد سیستم تحلیل شده و هفت نقطه بهینه چندهدفه شناسایی شده‌اند. بهترین نقطه با راندمان انرژی ۶۶ درصد در دمای ۷۰۰ درجه، چگالی جریان ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع بدست آمده است. گاندیگلیو و همکاران [۱۷] به مقایسه سیستم هیبریدی مستقیم و غیرمستقیم پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد سیستم هیبریدی مستقیم در مقایسه با غیرمستقیم دارای راندمان و توان تولیدی بیشتری است. حسینی و همکاران [۱۸] به عملکرد ترمودینامیکی و اقتصادی دو سیستم ترکیبی سه‌گانه شامل توربین گاز، پیل سوختی اکسید جامد و چیلر جذبی پرداختند. در تحقیق آنها تأثیر نسبت فشار کمپرسور و نسبت هوا به سوخت بر راندمان انرژی، اگررژی، هزینه تولید برق و نرخ اتلاف بررسی شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد افزایش نسبت فشار، راندمان و کاهش هزینه را بهبود می‌دهد، ولی استفاده از چیلر دومرحله‌ای با وجود کاهش اتلاف اگررژی، هزینه برق را افزایش می‌دهد. هاسلی همکاران [۱۹ و ۲۰] در دو مطالعه جداگانه، به بررسی تخریب اگررژی و آنتروپی تولیدی در یک سیستم ترکیبی پرداختند. آنان نشان دادند که با اضافه شدن پیل سوختی به توربین گاز، بازده قانون اول به میزان ۲۷/۸ درصد افزایش می‌یابد.

در این مطالعه، سیستم ترکیبی ارائه شده در شکل (۱) از منظر انرژی و اگررژی به صورت دقیق تحلیل و ارزیابی شده است. در این ساختار، جریان‌ها ابتدا وارد کمپرسور شده و پس از تراکم، به مبدل حرارتی هدایت می‌گردد. در مبدل حرارتی، دمای هوای فشرده افزایش یافته و سپس وارد پیل سوختی می‌شود. در پیل سوختی، واکنش‌های الکتروشیمیایی سبب تولید توان الکتریکی شده و علاوه بر آن حرارت قابل توجیه نیز آزاد می‌شود. محصولات خروجی پیل سوختی و بخشی از حرارت تولیدی آن به محفظه احتراق منتقل شده و در آن‌جا با سوخت تزریق شده مخلوط می‌گردد تا احتراق تکمیل شود. گازهای داغ حاصل، وارد توربین می‌شوند و بخشی از انرژی خود را به صورت کار مکانیکی برای چرخاندن کمپرسور و تولید توان مفید آزاد می‌کنند. در ادامه، گازهای خروجی از توربین اصلی وارد توربین قدرت می‌شوند تا توان بیشتری تولید گردد. این چرخه باعث افزایش بازده کلی سیستم و بهره‌برداری همزمان از مزایای پیل سوختی و توربین گاز می‌شود.

در این پژوهش مدل پیل سوختی بر پایه روابط جامع ترمودینامیکی توسعه یافته و با سیستم توربین گاز به صورت کوپل شده مدل سازی گردیده است. برای حل معادلات غیرخطی حاکم بر این سامانه، از روش عددی نیوتون-رافسون استفاده شده که دقت بالایی در همگرایی نتایج دارد. افزون بر آن، تأثیر متغیرهای کلیدی عملکردی در هر دو بخش توربین گاز و پیل سوختی بررسی شده است. به منظور افزایش کارایی و رسیدن به بیشینه بازده، یک الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی نوآورانه معرفی شده است که بر پایه تلفیق الگوریتم ژنتیک و سیمپلکس عمل می‌کند. در این روش، ابتدا الگوریتم ژنتیک با جستجوی گسترده در فضای پارامترها، نواحی امیدوارکننده را شناسایی می‌کند و سپس الگوریتم سیمپلکس، با تمرکز بر این نواحی، بهترین نقطه بهینه را با دقت بیشتری استخراج می‌نماید. این رویکرد ترکیبی، با بهره‌گیری از مزایای هر دو الگوریتم، ضمن کاهش زمان محاسباتی، احتمال دستیابی به پاسخ بهینه را افزایش داده و آن را از سایر روش‌های متدائل متمایز ساخته است.



شکل ۱. نمایی از سیستم ترکیبی توربین گاز با پیل سوختی

## ۲. مدل سازی انرژی و اگزرژی اجزاء سیستم ترکیبی

در این قسمت، معادلات حاکم بر اجزای سیکل ترکیبی توربین گاز با پیل سوختی اکسید جامد جهت مدل سازی ترمودینامیکی آورده شده است. در ادامه نیز آنالیز اگزرژی سیستم و روابط مربوط به آن آورده شده است. برای مدل سازی ترمودینامیکی، فرضیه هایی در نظر گرفته شده است که عبارتنداز: ۱. کلیه اجزاء توربین گاز، آدیاباتیک فرض می شوند؛ ۲. جریان سیال در تمام اجزا پایدار است؛ ۳. تغییرات انرژی های پتانسیل و جنبشی صفر فرض می شود؛ ۴. رفتار تمام گازها به صورت گاز ایده آل است؛ ۵. از آثار مربوط به خنک کاری توربین صرف نظر می شود.

### مدل سازی کمپرسور

هوای ورودی به کمپرسور، هوای محیط می باشد. ترکیب مولی هوای صورت  $0/21$  مول اکسیژن و  $0/79$  مول نیتروژن در نظر گرفته شده است. در سیستم های ترکیبی هوای فشرده شده تو سط کمپرسور، پس از گرم شدن تو سط مبدل حرارتی، وارد کاتند پیل سوختی می شود. کمپرسور را می توان به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفت؛ بنابراین، رابطه قانون اول برای آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{w}_c = \dot{m}_2 h_2 \quad (1)$$

توان مصرفی کمپرسور که از طریق توربین تأمین می شود، به صورت زیر است:

$$\dot{w}_c = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (2)$$

راندمان اگزرژی کمپرسور نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_{exe,C} = \frac{\dot{m}_1 (e_{x2} - e_{x1})}{\dot{w}_c} \quad (3)$$

برای تحلیل قانون دوم سیستم، با مشخص بودن شرایط ورودی و خروجی، نرخ نابودی اگزرژی در طی فرآیند تراکم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{E}_{x,dest,c} = \dot{w}_c - \dot{m}_1 (e_{x2} - e_{x1}) \quad (4)$$

### مدل سازی مبدل حرارتی

مبدل حرارتی به طور گسترده در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند و طراحی بسیار متنوعی دارند. نقطه مشترک همه آن ها این است که عملکرد هر کدام به سطح انتقال حرارت، خواص سیال و شکل جریان بستگی دارد. راندمان مبدل حرارتی را می توان به صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$\epsilon_{recup} = \frac{T_3 - T_2}{T_7 - T_2} \quad (5)$$

قانون اول ترمودینامیک برای مبدل حرارتی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{m}_2 (h_3 - h_2) = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (6)$$

از رابطه بالا برای محاسبه دمای گازهای گرم خروجی از سیکل می توان استفاده کرد.

با فرض  $\dot{m}_3 = \dot{m}_2$  و  $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$  راندمان اگزرژی و نرخ نابودی اگزرژی در مبدل حرارتی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\eta_{exe,Recup} = \frac{\dot{m}_3(e_{x3} - e_{x2})}{\dot{m}_7(e_{x7} - e_{x8})} \quad (7)$$

$$\dot{E}_{X,dest,Recup} = \dot{m}_7(e_{x7} - e_{x8}) - \dot{m}_3(e_{x3} - e_{x2}) \quad (8)$$

### مدل سازی پیل سوختی اکسید جامد

مدل پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه در این مقاله، بر اساس مدل توسعه یافته پیل سوختی اکسید جامد لوله در مرجع [۴] می‌باشد. واکنش‌های الکتروشیمیایی در آند و کاتد بر اساس رابطه‌های زیر رخ می‌دهد [۴]:



برای محاسبه ولتاژ پیل سوختی از معادله مشهور نزدست که به صورت زیر می‌باشد، استفاده می‌شود [۱۴]:

$$E = E^o - \frac{RT}{n_e F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (10)$$

که  $E^o$  به ترتیب پتانسیل استاندارد و بیشینه ولتاژ تغوری است که ولتاژ مدار باز نامیده می‌شود و زمانی که هیچ جریانی در مدار نباشد، ولتاژ پیل برابر آن خواهد بود. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش غلظت واکنش‌دهنده‌ها بیشینه ولتاژ پیل افزایش می‌باشد.

### ولتاژ عملکرد پیل سوختی اکسید جامد

وقتی پیل سوختی تحت شرایط عملکردی تولید جریان خارجی کار می‌کند، مقداری افت ولتاژ در پیل سوختی اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود ولتاژ خروجی پیل همیشه کمتر از مقدار بیشینه ولتاژ باشد. افتها که معمولاً پلاریزاسیون نامیده می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱- پلاریزاسیون فعال سازی، ۲- پلاریزاسیون اهمی، ۳- پلاریزاسیون غلظت. بنابراین ولتاژ اندازه‌گیری شده در یک پیل سوختی عملی معمولاً از ولتاژ برگشت‌پذیر کمتر است. ولتاژ عملکرد پیل سوختی پس از محاسبه  $V_{act}$ ,  $V_{ohm}$  و  $V_{con}$  به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (11)$$

در رابطه بالا افت ولتاژ معمولاً به فشار جزئی گازها، دما و چگالی جریان در یک پیل سوختی واقعی بستگی دارد. در ادامه به محاسبه افت ولتاژ در پیل سوختی پرداخته می‌شود.

### پلاریزاسیون فعال سازی

پلاریزاسیون فعال سازی  $V_{act}$  وابسته به سرعت واکنش الکتروشیمیایی بر روی سطح الکترود است. در واکنش‌های الکتروشیمیایی نیز مانند واکنش‌های شیمیایی، واکنش‌گرها باید از سد انرژی فعال سازی عبور کنند. اتلاف حاصل از پلاریزاسیون فعال سازی در دانسیتۀ جریان پایین قابل ملاحظه است و با افزایش دانسیتۀ جریان بهمیزان کمی افزایش می‌باید. پلاریزاسیون فعال سازی توسط رابطه نیمه‌تجربی پاتلر—ولمر به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$i = i_o \left\{ \exp \left( \alpha \frac{n_e F}{RT} V_{act} \right) - \exp \left[ -(1-\alpha) \frac{n_e F}{RT} V_{act} \right] \right\} \quad (12)$$

که  $i$  چگالی جریان تبادلی است و واحد آن  $A/m^2$  می‌باشد. از رابطه (۱۲) نمی‌توان  $V_{act}$  را به صورت مستقیم به دست آورد، اما برای پیلهای سوختی با الکترود هیدروژن مقدار  $\infty$  برابر  $5/0$  فرض می‌شود و خواهیم داشت [۱۴ و ۴]:

$$V_{act} = \frac{2RT}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_o} \right) \quad (13)$$

از طرفی چگالی جریان تبادلی، از رابطه نیمه‌تجربی برای آند و کاتد محاسبه می‌شود [۴ و ۱۴]:

$$i_{o,an} = \gamma_{an} \left( \frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left( \frac{P_{H_2,O}}{P_{ref}} \right) \exp \left( -\frac{E_{act,an}}{RT} \right) \quad (14)$$

$$i_{o,ca} = \gamma_{ca} \left( \frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left( -\frac{E_{act,ca}}{RT} \right) \quad (15)$$

$P_{ref}$  فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. ثابت‌های مورد نیاز براساس مرجع [۱۴] به دست می‌آیند.

### پلاریزاسیون اهمی

این افت ولتاژ، نتیجه مقاومت الکترودها و صفات اتصال دهنده در برابر جریان الکترون‌ها و مقاومت الکتروولیت در برابر جریان یون‌هاست. از آنجاکه این افت ولتاژ به صورت مستقیم با دانسیتۀ جریان پیل متناسب است، به آن پلاریزاسیون اهمی گفته می‌شود. با افزایش دانسیتۀ جریان، این افت ولتاژ نیز به تدریج افزایش می‌یابد. تلفات اهمی به شدت تابع دماست. بهخصوص در مورد الکتروولیت که بخش عمده‌ای از تلفات سلول در این بخش اتفاق می‌افتد. بر این اساس، پلاریزاسیون اهمی برای آند، کاتد، الکتروولیت و متصل‌کننده داخلی به صورت زیر خواهد بود [۲۹]:

$$V_{ohm,an} = \frac{i\rho_{an}(A\pi D)^2}{8d_{an}} \quad (16)$$

$$V_{ohm,ca} = \frac{i\rho_{ca}(8D)^2}{8d_{ca}} A[A + 2(1 - A - B)] \quad (17)$$

$$V_{ohm,el} = i\rho_{el} d_{el} \quad (18)$$

$$V_{ohm,in} = i(\pi D)\rho_{in} \frac{d_{in}}{W_{in}} \quad (19)$$

$A$  و  $B$  ثابت‌اند و مقادیر آن‌ها به ترتیب  $0/۸۰۴$  و  $۰/۱۳$  می‌باشد.  $\rho$  و  $d$  نیز به ترتیب، مقاومت ویژه و ضخامت هر جزء پیل سوختی اکسید جامد می‌باشند. مقدار ضخامت هر جزء در جدول (۲) آورده شده است.  $D$  قطر پیل سوختی و مقدار آن برابر  $22\text{mm}$  و  $W_{in}$  عرض متصل‌کننده داخلی است و مقدار آن برابر  $11\text{mm}$  است. مقاومت ویژه تابع دما است و از رابطه تجربی زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$\rho = a \exp \left( \frac{b}{T} \right) \quad (20)$$

که ثابت‌های  $a$  و  $b$  معادله (۲۰) براساس مرجع [۱۴] آمده است.

### پلاریزاسیون غلظت

اگر واکنش‌گرها به مقدار کافی به الکترود نرسد، نوعی افت در میزان پتانسیل در الکترود به وجود می‌آید و شاهد به وجود آمدن یک گرادیان غلظت خواهیم بود. گونه‌های واکنش‌دهنده در پیل سوختی باید از کانال‌های سوخت و هوا از طریق محیط متخلخل الکترود به محل انجام واکنش انتقال یابند. در این حالت، مکانیزم غالب انتقال، نفوذ است. به علاوه، محصولات واکنش الکتروشیمیایی که در آند ایجاد می‌شوند، پس

از کاهش دادن غلظت سوخت در این ناحیه، مقاومت غلظتی را افزایش می‌دهند. عوامل فراوانی در به وجود آمدن گردیان غلظت مؤثرند از جمله: نفوذ آهسته واکنشگرهای گازی در حفره‌های کاتالیست، انحلال واکنشگرهای در الکتروولیت، خروج آهسته محصول واکنش از الکتروولیت. در عمل انتقال کند واکنشگرهای به مکان‌های فعال انجام واکنش سبب کند شدن فرآیند می‌شود. در شرایط عادی، عملکرد پیل، مقادیر مربوط به این افت ولتاژ بسیار کم است. این اتلاف در چگالی جریان بالا اثر بیشتری دارد، زیرا رساندن سوخت به میزان کافی به مکان‌های انجام واکنش با مشکل زیادی روبرو می‌شود. این پلاریزاسیون با کمیتی به نام چگالی جریان حدی به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$V_{con} = \frac{RT}{n_e F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (21)$$

چگالی جریان حدی  $i_L$ ، جریانی است که در آن، نرخ مصرف سوخت برابر با مقدار آن در زمانی است که بیشترین سرعت تعذیه سوخت برقرار است و این در زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت روی سطح به صفر برسد، یعنی تمام واکنش‌دهنده‌ها مصرف شود. در اینجا برای مدل سازی  $V_{con}$  از مقدار چگالی جریان حدی  $i$ ، برابر  $\frac{A}{M^2} ۹۰۰۰$  استفاده شده است [۴]. نرخ جریان مولی هیدروژن در واکنش الکتروشیمیابی با چگالی جریان ارتباط مستقیم دارد. با دانستن چگالی جریان با استفاده از قانون فارادی می‌توان نرخ مولی هیدروژن ( $z$ ) را از رابطه زیر به دست آورد.

$$z = \frac{i \cdot A_{act} \cdot N}{n_e \cdot F} \quad (22)$$

تعداد پیل سوختی و  $A_{act}$  مساحت موثر پیل است. همچنین مقدار گازها در ورودی و خروجی پیل سوختی به صورت زیر موازن می‌شود:

$$n_{H_2,in} = \frac{z}{U_f} \quad (23)$$

$$n_{O_2,in} = \frac{z}{2U_a} \quad (24)$$

$$n_{H_2,out} = n_{H_2,in} - z \quad (25)$$

$$n_{H_2O,out} = n_{H_2O,in} + z \quad (26)$$

$$n_{O_2,out} = n_{O_2,in} - \frac{z}{2} \quad (27)$$

$$n_{N_2,out} = n_{N_2,in} \quad (28)$$

$U_a$  و  $U_f$  به ترتیب فاکتور مصرف سوخت و هوای می‌باشد. اکنون پس از محسنة افت ولتاژهای فوق، ولتاژ کاری پیل با استفاده از معادله (۱۱) به دست می‌آید. توان مستقیم تولید شده توسط پیل سوختی اکسید جامد را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\dot{W}_{FC} = V_{cell} I \quad (29)$$

قانون اول ترمودینامیک برای پیل سوختی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{fuel,Fc} \times U_f \times LHV - \dot{W}_{Fc,dc} - \dot{Q}_{surr} + \dot{m}_{fuel,Fc} \times (1 - U_f) h_{fuel} - \dot{m}_4 h_4 = 0 \quad (30)$$

که  $\dot{W}_{Fc,dc}$  توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد است و  $\dot{Q}_{surr}$  گرمای هدر رفته از سیستم می‌باشد.

مقدار گرمای هدر رفته در هر توده پیل سوختی از طریق میزان افت ولتاژ ایجاد شده در پیل سوختی قابل حصول است.

$$Q_{surr} = I \cdot \Delta V_{loss} = i \cdot A_{act} \cdot (E - V_{cell}) \quad (31)$$

راندمان اگررژی و نرخ نابودی اگررژی در پیل سوختی به صورت زیر است:

$$\eta_{exe,FC} = \frac{\dot{W}_{FC,dc}}{\dot{m}_{fuel,FC}(e_f^{ph} + U_f e_f^{ch}) - \dot{m}_4 e_{x4} + \dot{m}_3 e_{x3}} \quad (32)$$

$$\dot{E}_{x,dest,FC} = \dot{m}_3 e_{x3} - \dot{m}_4 e_{x4} - \dot{W}_{FC,dc} + \dot{m}_{fuel,FC}(e_f^{ph} + U_f \times e_f^{ch}) \quad (33)$$

### محفظة احتراق

محصولات خروجی از پیل سوختی به همراه مقداری از سوخت که در پیل سوختی واکنش نداده‌اند، همراه با سوخت اضافی وارد محفظة احتراق می‌شوند و در آنجا واکنش می‌دهند و گازهای خروجی با دمای بالا تولید می‌کنند. در مدل‌سازی جریان در محفظة احتراق، فرض شده است که فرآیند احتراق یک فرآیند فشار ثابت است. همچنین فرض شده است که هیچ اتلاف انرژی در محفظة احتراق رخ نمی‌دهد. قانون اول ترمودینامیک برای محفظة احتراق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$(\dot{m}_3 + U_f \times \dot{m}_{fuel,FC}) h_4 + \dot{Q}_{comb} - \dot{m}_5 h_5 - \dot{Q}_{loss} = 0 \quad (34)$$

همچنین راندمان اگررژی و نرخ نابودی اگررژی در محفظة احتراق به صورت زیر است:

$$\dot{E}_{x,dest,comb} = \dot{m}_4 e_{x4} + \dot{m}_{fuel,FC}(1 - U_f) e_f^{ch} - \dot{m}_5 e_{x5} + \dot{m}_{fuel,comb}(e_f^{ph} + e_f^{ch}) \quad (35)$$

### توربین

توربین، وظیفه تأمین کار مورد نیاز کمپرسور را بر عهده دارد و باید از لحاظ طراحی با کمپرسور مطابقت داشته باشد. برای مدل‌سازی توربین لازم است آن را به صورت یک حجم کنترل در نظر بگیریم. رابطه قانون اول برای آن به صورت زیر است:

$$\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 + \dot{w}_{GT} = 0 \quad (36)$$

راندمان اگررژی توربین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{exe,GT} = \frac{\dot{w}_{GT}}{\dot{m}_5(e_{x5} - e_{x6})} \quad (37)$$

نرخ نابودی اگررژی نیز در توربین به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{E}_{X,dest,GT} = \dot{m}_5(e_{x5} - e_{x6}) - \dot{w}_{GT} \quad (38)$$

برای توربین قدرت نیز روابط مشابه توربین قابل محاسبه است.

### ۳. معادلات تعادلی سیستم ترکیبی

بقای انرژی برای سیکل ترکیبی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{fuel,Fc} \cdot U_f \cdot LHV_{H_2} + \dot{Q}_{comb} - \dot{m}_8 h_8 - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{surr} - \dot{W}_{Fc,dc} - \dot{w}_{PT} = 0 \quad (43)$$

که  $\dot{Q}_{comb}$  گرمای تولیدی در محفظة احتراق و  $\dot{Q}_{loss}$  گرمای هدررفته می‌باشد. راندمان حرارتی سیکل ترکیبی توربین گاز با پیل سوختی به صورت نسبت توان خالص تولیدی خروجی به نرخ انرژی ورودی تعریف می‌شود؛ بنابراین رابطه راندمان حرارتی کل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{th}^{cyc} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{tot}} \quad (44)$$

$\dot{W}_{net}$  توان خالص تولید شده توسط سیکل است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{T,Gen} + \dot{W}_{Fc,Ac} \quad (45)$$

در رابطه (۴۰)،  $\dot{W}_T$  و  $\dot{W}_{Fc,Ac}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{Fc,Ac} = \dot{W}_{Fc,dc} \times \eta_{invert} \quad (46)$$

$$\dot{W}_{T,Gen} = \eta_{Gen} \dot{W}_T \quad (47)$$

راندمان اگزرزی کل سیستم نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{exe}^{cyc} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{fuel} (e_f^{ph} + e_f^{ch})} \quad (48)$$

نرخ نابودی اگزرزی برای یک حجم کنترل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{E}_{x,dest} = \sum_i (\dot{E}_{x,in}) - \sum_i (\dot{E}_{x,out}) - \dot{W} + \sum_j \dot{Q}_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \quad (49)$$

با استفاده از رابطه بالا نرخ نابودی اگزرزی کل سیستم برابر است با:

$$\dot{E}_{x,dest,total} = \dot{m}_1 e_{x1} + \dot{m}_{fuel} (e_f^{ph} + e_f^{ch}) - \dot{m}_8 e_{x8} - \dot{W}_{net} \quad (50)$$

پارامترهای اصلی طراحی شرایط عملکردی سیستم ترکیبی در براساس مرجع [۱۹] نشان داده شده است.

#### ۴. الگوریتم‌های ابتکاری

روش مورد استفاده در بهینه‌سازی بایستی ضمن بهینه‌سازی اصلی طراحی، قیود و امکانات موجود را در طراحی مدنظر داشته باشد. پارامترهای اصلی طراحی به پارامترهایی گفته می‌شوند که دارای سه ویژگی باشند: اولاً مستقل از یکدیگر باشند، ثانیاً این پارامترها بایستی به شدت بر روی نیازهای مأموریتی تعریف شده تأثیرگذار باشند، ثالثاً این پارامترها بایستی تأثیر مستقیم بر روی معیار طراحی داشته باشند. الگوریتم‌های ابتکاری می‌توانند یافتن جواب‌های خوب در فاصله مشخصی از جواب بهینه را تضمین کنند که این امر در با سرعت و دقیق قابل قبولی صورت می‌گیرد. برخی از هیوریستیک‌ها می‌توانند خیلی خوب (گاهی تا حد بهینگی) عمل کنند؛ اما می‌توانند در جواب‌هایی با کیفیت به دام افتند. برای بهبود این الگوریتم‌ها موج تازه‌ای از رویکردها شامل الگوریتم‌هایی است که صریحاً یا به طور ضمنی تقابل بین ایجاد تنوع جستجو<sup>۱</sup> (وقتی عالمی وجود دارد که جستجو به سمت مناطق بد فضای جستجو می‌رود) و تشدید جستجو<sup>۲</sup> (با این هدف که بهترین جواب را در منطقه موجود برسی پیدا کند) را مدیریت می‌کنند. از بین الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی، آنیل شبیه‌سازی شده، جستجوی ممنوع، بهینه‌سازی جمعیت ذرات، بهینه‌سازی کلونی مورچگان و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد. معروف‌ترین و کارآترین این رویکردها الگوریتم‌هایی است که با الگوریتم از تکامل ژنتیکی، الگوهایی برای حل مسئله ارائه می‌کنند. این الگوریتم‌ها یک روش جستجوی مؤثر در فضاهای بسیار بزرگ ایجاد می‌کنند که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن جواب بهینه می‌گردد.

<sup>1</sup> Exploration  
<sup>2</sup> Exploitation

## الگوریتم سیمپلکس

الگوریتم سیمپلکس برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم با استفاده از روش‌های مستقیم برای بهینه‌سازی تابع هزینه استفاده می‌کند. این الگوریتم یک الگوریتم ابتکاری است که ابتدا توسط اسپندلی، هکست و هیمس ورث شناخته شد و در سال ۱۹۶۵ تو سط جان نلدر و راجر مید برای بهینه‌سازی توابع هزینه چندبعدی توسعه یافت [۲۲]. لازم به ذکر است که این الگوریتم بیشتر بر مبنای قواعد ریاضی است تا این که بر مبنای طبیعت باشد زیرا که اکثر الگوریتم‌ها ابتکاری برگرفته از طبیعت هستند. مبنای کار در این الگوریتم به این صورت است که شکلی به صورت سیمپلکس-به شکل هندسی که از تعداد  $n+1$  نقطه در فضای  $n$  بعدی تشکیل شده باشد، سیمپلکس می‌گویند- در اطراف جواب بهینه تولید می‌شود و با ضرایبی که وجود دارد سیمپلکس با انبساط و انقباض مواجه می‌شود تا این که به جواب بهینه نزدیک شود. بنابراین، استفاده از فرمولا سیون زیر باعث ایجاد یک سیمپلکس منتظم در فضای  $n$  بعدی می‌شود:

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_0 + p\mathbf{u}_j + \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^n q\mathbf{u}_s \quad (51)$$

که در معادله‌ی بالا  $\mathbf{x}_0$  نقطه‌شروع اولیه،  $\mathbf{u}_s$  بردار یکه در امتداد مختصات  $j$  ام است که  $p$  و  $q$  به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$p = \frac{a}{n\sqrt{2}} \left( \sqrt{n+1} + n - 1 \right) \quad (52)$$

$$q = \frac{a}{n\sqrt{2}} \left( \sqrt{n+1} - 1 \right) \quad (53)$$

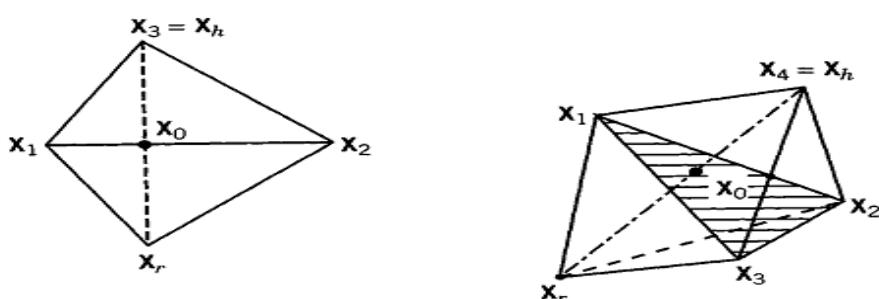
که در روابط بالا  $a$  طول ضلع سیمپلکس است. حرکت الگوریتم سیمپلکس برای رسیدن به نقطه بهینه توسط سه عملگر (انعکاس، انقباض و انبساط) صورت می‌گیرد که معادله حاصله از آن در ادامه تبیین شده است:

$$\mathbf{x}_r = (1+\alpha)\bar{\mathbf{x}}_0 - \alpha\mathbf{x}_h \quad \alpha > 0 \quad (54)$$

$$\mathbf{x}_e = \gamma\mathbf{x}_r + (1-\gamma)\bar{\mathbf{x}}_0 \quad \gamma > 1 \quad (55)$$

$$\mathbf{x}_c = \beta\mathbf{x}_h + (1-\beta)\bar{\mathbf{x}}_0 \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (56)$$

به عنوان نمونه اگر  $x_h$  نقطه‌ای باشد که بیشترین مقدار تابع هزینه را در سایر نقاط داشته باشد،  $x_r$  را از انعکاس  $x_h$  بدست می‌آید. که در این صورت یک سیمپلکس جدید ایجاد می‌گردد. این پیشامد در شکل (۲) نشان داده شده است.



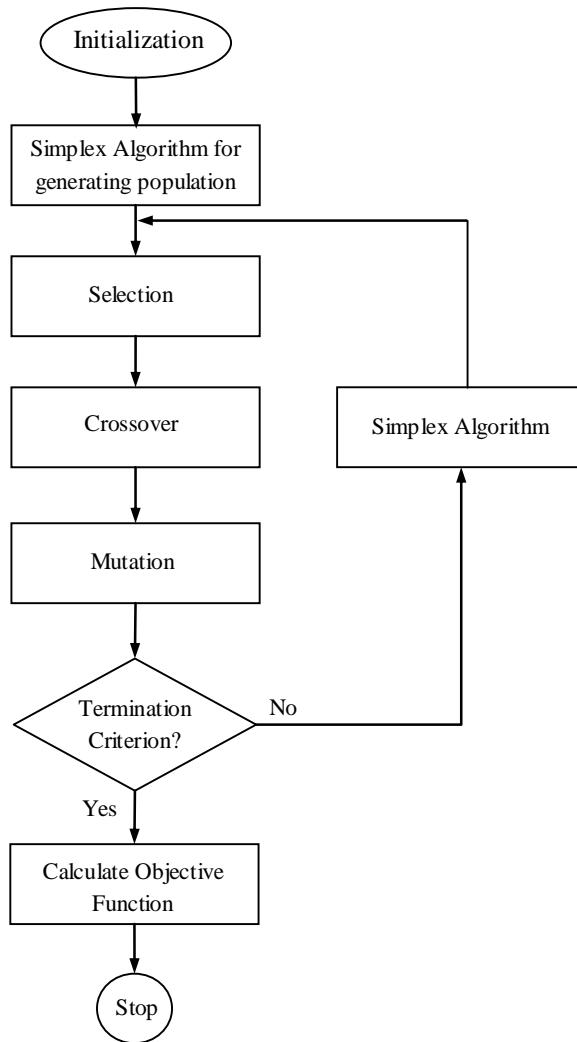
شکل ۲. انعکاس سیمپلکس [۳۴]

## الگوریتم ژنتیک

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ توسط ریچنبرگ مطرح گردید و الگوریتم ژنتیک که منشعب از این الگوریتم‌هاست در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه ساختار ژن و کروموزوم‌هاست که توسط پرسور هالند مطرح شد و توسط جمعی از دانشجویانش چون گلدبُرگ توسعه یافت [۲۲ و ۲۳]. بر اساس نظریه تکاملی داروین آن دسته از صفات طبیعی که با قوانین طبیعی سازگاری بیشتری دارند، شناس بقا بیشتری دارند. این نظریه هیچ اثبات تحلیلی و قطعی ندارد، اما از نظر تجربی و آماری تأیید شده است. قانون انتخاب طبیعی بدین صورت است که گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آنها ای که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طی زمان از بین می‌روند. بنابراین می‌توان انتخاب طبیعی را یک رقابت برای حفظ خصوصیات برتر دانست. این اصول پایه‌های شکل‌گیری الگوریتم‌های تکاملی برای تعمیم خواص تکامل زیستی به مسائل مهندسی و علمی را تشکیل می‌دهد. الگوریتم‌های ژنتیک یکی از انواع الگوریتم‌های تکاملی اند که از علم زیست‌شناسی مثل وراثت، جهش، انتخاب ناگهانی، انتخاب طبیعی و ترکیب الهام گرفته شده است. تکامل از یک جمعیت اولیه آغاز شده و در نسل‌های بعدی تکرار می‌شود. نکته مهم در عملکرد GA انتخاب مناسب‌ترین‌ها در هر نسل است و نه بهترین‌ها.

## الگوریتم سیمپلکس-ژنتیک

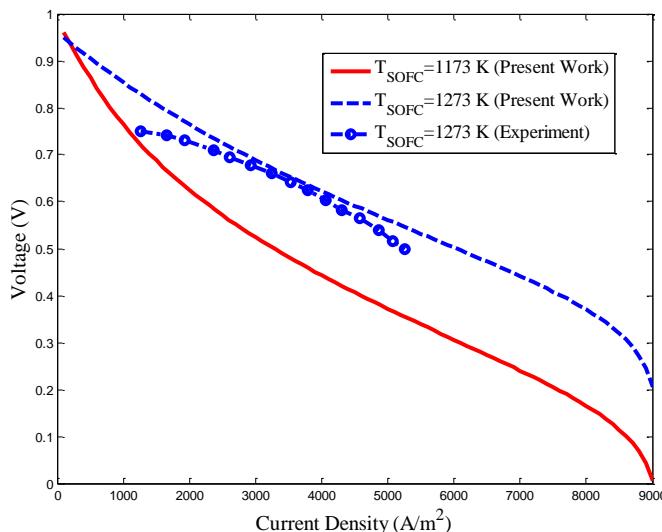
الگوریتم ژنتیک-سیمپلکس یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی است. در این الگوریتم، الگوریتم سیمپلکس وظیفه شناسایی افراد برجسته جمعیت و الگوریتم ژنتیک وظیفه استخراج جواب بهینه را بر عهده دارد. نحوه کارکرد این الگوریتم به این صورت است که ابتدا یک نسل، توسط الگوریتم سیمپلکس برای الگوریتم ژنتیک ایجاد می‌شود، این نسل اولیه توسط عملگرهایی که در الگوریتم ژنتیک وجود دارد از قبیل: جهش، تولید فرزند و ... به سمت جواب بهینه نزدیک می‌شود، در این هنگام دوباره با استفاده از الگوریتم ژنتیک، از میان افرادی جامعه، نسلی که دارای شایستگی است انجام می‌شود. حال اگر شرایط توقف ارضاء شده باشد الگوریتم توقف می‌کند ولی اگر به شرایط مطلوب نرسیده باشد توسط الگوریتم سیمپلکس یک گوناگونی برای نسل بعد ایجاد می‌کند، که مجدد الگوریتم از این نسل ایجاد شده برای رسیدن به جواب بهینه بهره می‌گیرد. این عمل بارها تکرار می‌شود تا به جواب بهینه نزدیک شود. فلوچارت این الگوریتم ابتکاری در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم سیمپلکس-زنگیک

## ۵. نتایج

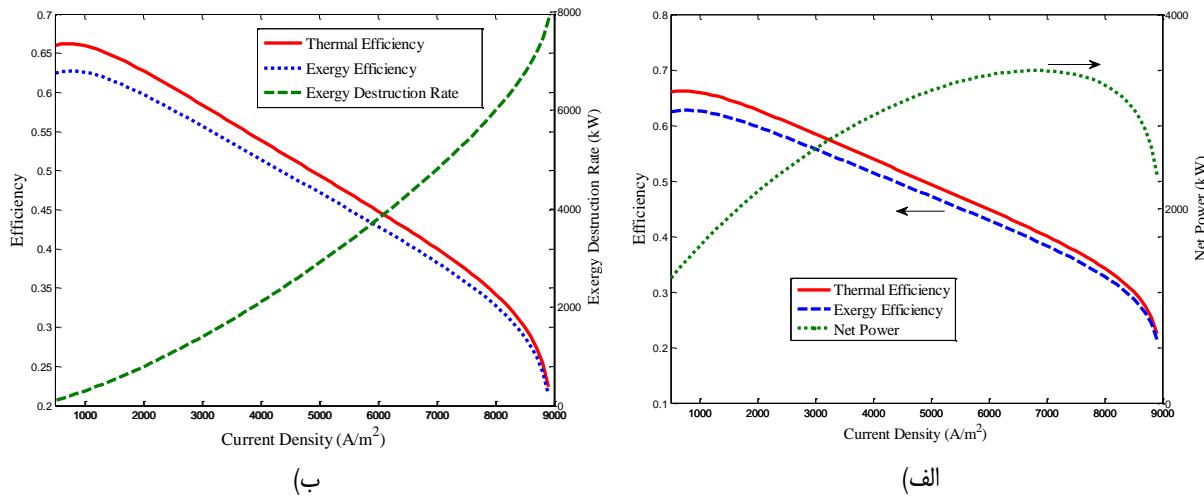
برای اعتبارسنجی مدل‌سازی پیل، نتایج عددی با نتایج تجربی مرجع [۲۵] مقایسه شده است. مطابق با شکل (۴) افزایش دمای پیل سوختی اکسید جامد، باعث افزایش ولتاژ آن می‌شود. در داده‌های تجربی نیز روند مشابهی وجود دارد و درستی نتایج را تأیید می‌کند، اما اختلاف ناچیز ایجاد شده ناشی از عوامل مختلفی است. در عمل فرآیند الکتروشیمیایی شامل مکانیزم پیچیده‌ای است. مدل‌سازی هر کدام از افتها خود نیازمند در نظر گرفتن رفتارهای مولکولی اجزای واکنش‌دهنده می‌باشد. همچنین در مدلی که در تحقیق درنظر گرفته شده است، همانند مدل‌های قبلی، از توزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی روی پیل سوختی، اختلاف دما و فشار بین ورودی و خروجی آند و کات، همراه بودن نیتروژن و دیگر گازهای موجود در هوا با اکسیژن صرف نظر شده است، که این باعث ایجاد اندکی اختلاف با مقادیر تجربی شده است.



شکل ۴. نمودار ولتاژ پیل سوختی بر حسب چگالی جریان و مقایسه با مقدار تجربی [۱۴] در دمای ۱۲۷۳ کلوین

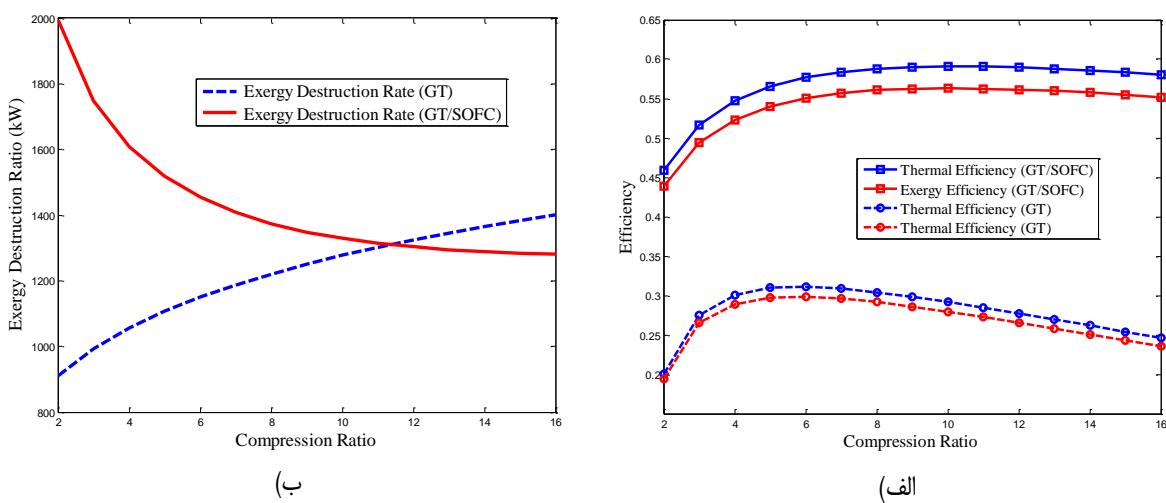
#### تحلیل پارامتریک سیکل ترکیبی

شکل (۵-الف) اثر شدت جریان بر توان تولیدی سیستم و راندمان را نشان می‌دهد. هنگامی که فاکتور مصرف سوخت و فاکتور مصرف هوا، و همچنین دمای عملیاتی پیل سوختی ثابت باشد، با افزایش چگالی جریان، توان پیل سوختی افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیمم می‌رسد. افزایش بیشتر شدت جریان و نزدیک شدن به چگالی جریان حدی، بر اثر افزایش فراوان افتها، باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه باعث کاهش توان پیل سوختی که سهم عمده در توان کلی سیستم ترکیبی توربین گازی مجهز به پیل سوختی دارد، می‌شود. در نهایت توان کلی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین در نقطه‌ای که چگالی جریان به مقدار چگالی جریان حدی می‌رسد، به دلیل افزایش میزان افت ولتاژ ناشی از غلظت و کاهش شدید ولتاژ عملکردی پیل، توان پیل سوختی مقدار صفر می‌شود. همچنین افزایش چگالی جریان، باعث کاهش راندمان حرارتی و راندمان اگررژی سیستم ترکیبی می‌شود، زیرا با افزایش شدت جریان، نرخ سوخت ورودی به پیل سوختی افزایش می‌یابد و به دلیل زیاد بود ارزش حرارتی سوخت ورودی در رابطه راندمان، راندمان سیستم کاهش می‌یابد. شکل (۵-ب) اثر شدت جریان بر راندمان سیستم و نرخ نابودی اگررژی را نشان می‌دهد. در اثر افزایش شدت جریان میزان نرخ نابودی اگررژی سیستم افزایش می‌یابد. افزایش شدت جریان در واقع به معنای افزایش میزان اگررژی و افزایش میزان نرخ انتقال حرارت و در نتیجه افزایش میزان نابودی اگررژی می‌شود. همچنین افزایش شدت جریان در واقع به معنای افزایش سوخت بیشتر به پیل سوختی می‌باشد که خود عاملی بر افزایش میزان برگشت ناپذیری و افزایش نابودی اگررژی می‌باشد.



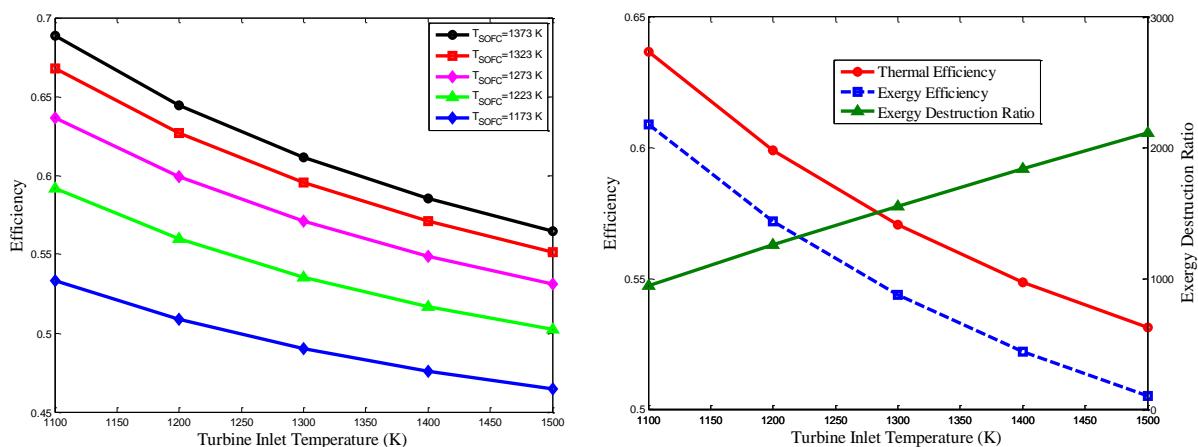
شکل ۵. تأثیر شدت جریان (الف) بر راندمان حرارتی، راندمان اگزرزی و توان تولیدی سیکل ترکیبی، (ب) بر راندمان حرارتی، اراندمان اگزرزی و نرخ نابودی اگزرزی سیستم ترکیبی

شکل (۶-الف) عملکرد فوق العاده سیکل ترکیبی در مقایسه با سیستم معمولی را نشان می‌دهد. یکی از علی که باعث می‌شود پیل سوختی دما بالا استفاده شود، این است که سیال در حال کار قبل از ورود به محفظه احتراق را پیش‌گرم می‌کند و همچنین باعث تولید انرژی بیشتر می‌شود. هر دو عامل باعث افزایش انرژی در مقایسه با حالت معمولی می‌شود. براساس مقادیر پیش‌بینی شده در شکل (۶-الف)، سیکل ترکیبی  $27/45$  درصد عملکرد بهتری نسبت به توربین گاز معمولی در راندمان حرارتی سیستم دارد. شکل (۶-ب) یک مقایسه بین سیستم ترکیبی با پیل سوختی و بدون پیل سوختی در نسبت فشارهای مختلف و دمای ورود به توربین  $1250$  درجه کلوین بر نرخ نابودی اگزرزی را نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود افزایش فشار در سیستم ترکیبی به علت آنکه باعث افزایش توان پیل سوختی می‌شود و چون در سیستم‌های ترکیبی با پیل سوختی عده توأم را پیل سوختی تامین می‌نماید، میزان نرخ نابودی اگزرزی در سیستم در مقابل سیستم بدون پیل سوختی کاهش می‌دهد. در سیستم بدون پیل سوختی افزایش فشار به معنای افزایش کار بیشتر کمپرسور می‌باشد و در نتیجه میزان برگشت ناپذیری در سیستم را افزایش می‌دهد.

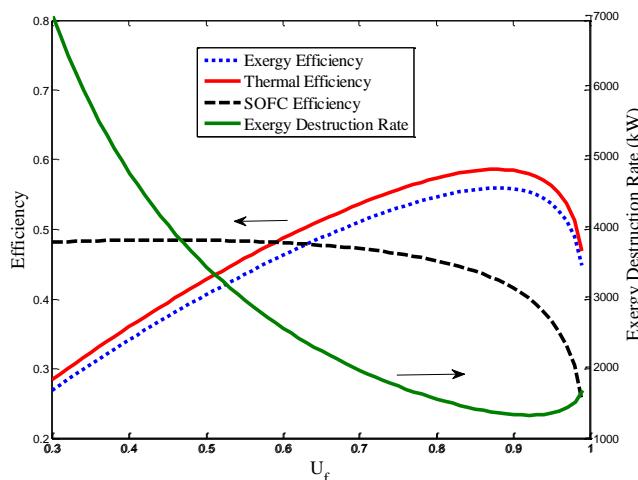


شکل ۶. اثر نسبت فشار (الف) بر راندمان حرارتی و اگزرزی سیستم با پیل سوختی و بدون پیل سوختی (ب) بر نرخ نابودی اگزرزی در سیستم ترکیبی با پیل سوختی و بدون پیل سوختی

اثر درجه حرارت توربین بر راندمان حرارتی و اگزرزی و نرخ نابودی اگزرزی را در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. هنگامی که دمای ورودی توربین افزایش می‌یابد، در راندمان حرارتی و اگزرزی کاهش دیده می‌شود. این نتیجه جالب توجه است که نشان می‌دهد دمای بیشتر سیال عامل بعد از پیل سوختی در محفظه احتراق مؤثر نیست، اما این دلیل عدمه برای استفاده از محفظه احتراق برای سوزاندن جریان سوختی واکنش نداده در پیل سوختی می‌باشد. توان ویژه خروجی از سیکل ترکیبی و همچنین کنترل بخشی از این سیستم از دلایل استفاده از محفظه احتراق است. شکل (۷-الف) نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت ورودی به توربین، به علت تزریق بیشتر سوخت به محفظه احتراق و در احتراق بالا بودن هدردهی اگزرزی در طی فرآیند احتراق، باعث افزایش نرخ نابودی اگزرزی سیستم ترکیبی می‌شود. شکل (۷-ب) اثر راندمان حرارتی در اثر افزایش دمای ورود به توربین در دمایهای مختلف عملکردی پیل سوختی را نشان می‌دهد. در اثر افزایش دمای عملیاتی پیل سوختی به علت افزایش ولتاژ پیل سوختی توان پیل سوختی نیز افزایش و در نتیجه راندمان کل سیستم افزایش می‌یابد. شکل (۸) اثر فاکتور مصرف سوخت بر نرخ نابودی اگزرزی کل سیستم و راندمان حرارتی و اگزرزی سیستم را می‌توان دید. توان تولیدی سیستم با افزایش اثر فاکتور مصرف سوخت به دلیل افزایش افت ولتاژ فعالسازی و کاهش ولتاژ پیل سوخت کاهش می‌یابد، در نتیجه کاهش این ولتاژ، توان سیستم نیز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اثر فاکتور مصرف سوخت به دلیل کاهش مصرف سوخت، ابتدا باعث افزایش راندمان می‌شود، اما با افزایش بیشتر اثر فاکتور مصرف سوخت، چون افت ولتاژ بسیار افزایش می‌یابد، در نتیجه ولتاژ پیل بسیار کاهش می‌یابد، و کاهش توان بسیار زیاد می‌شود، سپس باعث کاهش راندمان می‌شود.



شکل ۷. الف) راندمان حرارتی و اگزرزی و نرخ نابودی اگزرزی سیستم ترکیبی نسبت به به دمای ورود به توربین مختلف، ب) راندمان حرارتی سیستم ترکیبی نسبت به دمای ورود به توربین در دمایهای مختلف عملکردی پیل سوختی

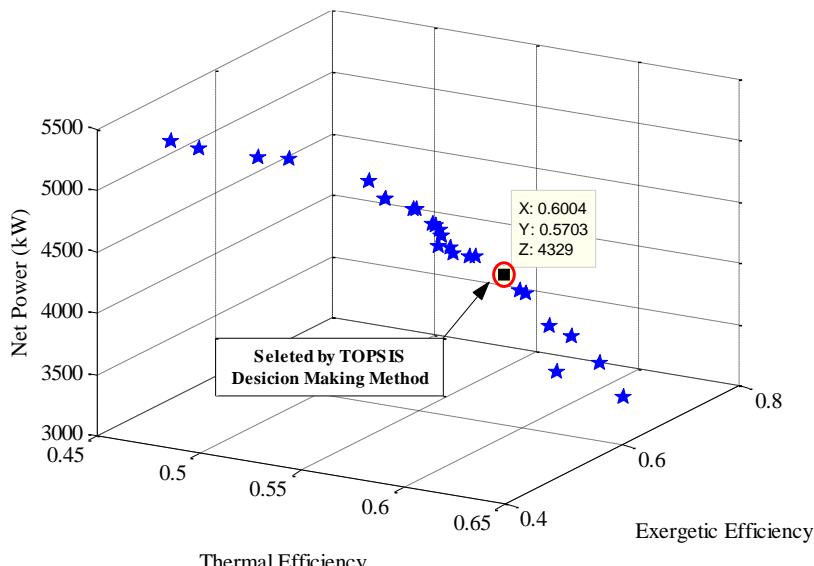


شکل ۸. اثر فاکتور مصرف سوخت بر راندمان پیل سوختی و راندمان حرارتی و اگزرزی و توان تولیدی سیکل ترکیبی

## نتایج بهینه‌سازی

در این قسمت نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیکل ترکیبی با توجه به الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. توابع هدف جهت بهینه‌سازی شامل راندمان حرارتی، راندمان اگررژی و توان خالص است و متغیرهای طراحی عبارتنداز: نسبت فشار کمپرسور، راندمان آیزنتروپیک کمپرسور، راندمان مبدل حرارتی، فاکتور مصرف سوخت در پیل سوختی، فاکتور مصرف هوا در پیل سوختی، چگالی جریان، راندمان آیزنتروپیک توربین و راندمان آیزنتروپیک توربین قدرت. پرتو حاصل از این بهینه‌سازی به صورت شکل (۹) ارائه شده است. همانطورکه در جهه پرتو به وضوح می‌توان دید، زمانی که حداقل بازده حرارتی (حدود ۴۵ درصد) است توان خالص سیستم به بیشینه خود (حدود ۵۴۰۰ کیلووات) می‌رسد. همچنین زمانی که حداکثر بازده حرارتی (حدود ۶۵ درصد) است توان خالص سیستم به کمینه خود (حدود ۳۳۰۰ کیلووات) می‌رسد.

ضمناً، برای انتخاب نقطه بهتر در نمودار جبهه پرتو از روش TOPSIS استفاده شده است [۲۴]. این روش یکی از تکنیک‌های مورد استفاده در تصمیم‌گیری چند هدفه است. فلسفه کلی این روش آن که با استفاده از گزینه‌های موجود، دو گزینه فرضی که اصطلاحاً آن را ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) نام دارد، انتخاب می‌شود. معیار انتخاب گزینه برتر در روش TOPSIS این است که گزینه تا حد امکان به گزینه ایده‌آل مثبت نزدیک و از گزینه ایده‌آل منفی دور باشد.

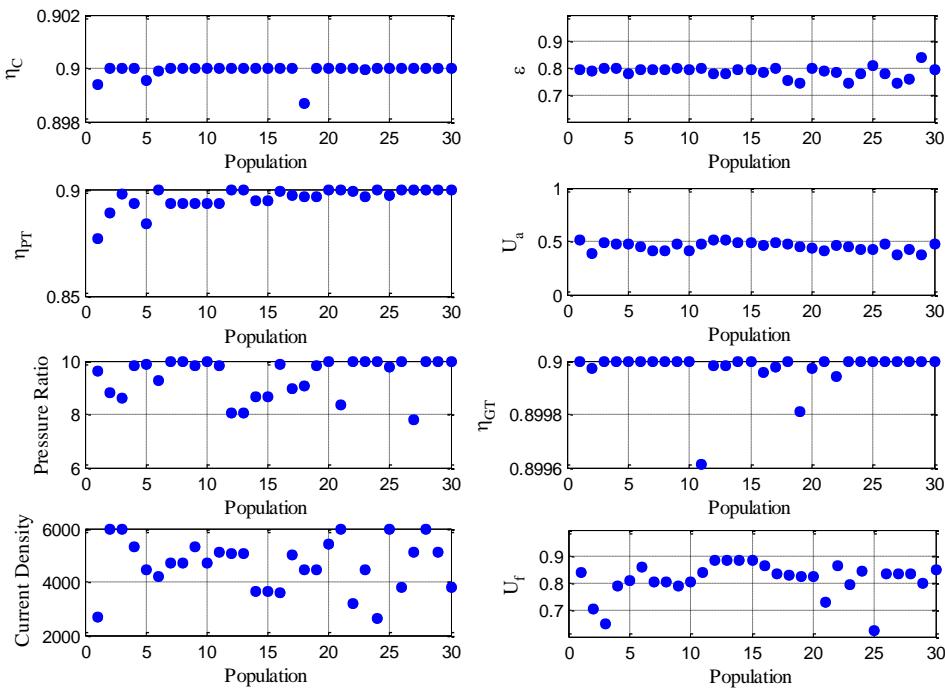


شکل ۹. جبهه بهینه پرتو بدست آمده از روش بهینه‌ابنکاری برای سیکل ترکیبی

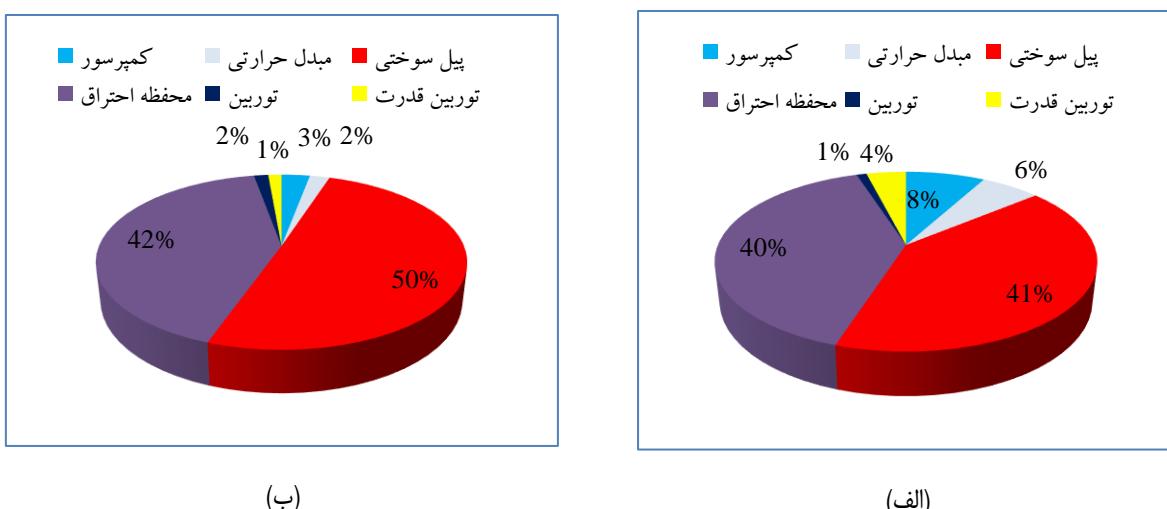
جدول ۱ نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدف بر اساس انتخاب مناسبترین نقطه به روش TOPSIS را با نتایج حالت پایه نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۰) توزیع پارامترهای طراحی را در جبهه پرتو نشان می‌دهد. شکل (۱۱) میزان درصد نابودی اگررژی در اجزای مختلف سیکل ترکیبی در حالت پایه و بهینه شده را نشان می‌دهد. در هر دو حالت بیشترین برگشت‌ناپذیری در پیل سوختی و سپس در محفظه احتراق رخ می‌دهد؛ جایی که بیشترین میزان سوخت در آنجا واکنش می‌دهد. البته باید توجه داشت که در حالت بهینه درصد نابودی اگررژی در پیل سوختی بیشتر از حالت پایه است. زیرا در حالت بهینه نسبت فشار کمپرسور بیشتر از حالت پایه است و در نتیجه دمای خروجی از کمپرسور افزایش، در نتیجه میزان سوخت تزریقی به محفظه کاهش می‌یابد.

جدول ۱. مقایسه متغیرهای طراحی در حالت پایه و بهینه

$\eta_{GT}$	$U_f$	$I$	$U_a$	$R_p$	$\eta_{PT}$	$\varepsilon$	$\eta_c$	متغیرهای طراحی
۰/۸۴	۰/۸۵	۳۰۰۰	۰/۲۵	۴	۰/۸۹	۰/۸	۰/۸۱	حالت پایه
۰/۹	۰/۸۶	۴۲۰۰	۰/۴۵	۹/۲۵	۰/۹	۰/۸	۰/۹	حالت بهینه



شکل ۱۰. توزیع مقادیر بهینه پارامترهای طراحی



شکل ۱۱. میزان درصد نابودی اگررژی در اجزای مختلف سیکل ترکیبی: (الف) حالت پایه ب) حالت بهینه

## نتیجه‌گیری

در این مقاله با بکارگیری یک الگوریتم بهینه پیشنهادی برپایه الگوریتم سیمپلکس و رزتیک، بهینه سازی سیکل توربین گاز مجهز به پیل سوختی اکسیدجAMD انجام شده است. در ابتدا به منظور یافتن پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سیستم یک آنالیز پارامتریک صورت گرفت. سه تابع هدف راندمان حرارتی و اگزرزی و توان خالص به منظور بهینه سازی سیکل ترکیبی انتخاب شد و نمودار جبهه پرتو برای آن ترسیم گردید. برای انتخاب نقطه بهتر در نمودار جبهه پرتو از روش TOPSIS استفاده شد. نتیجه این انتخاب نشان داد که مناسب‌ترین نقطه در جبهه پرتو دارای راندمان حرارتی ۶۰٪، در حالیکه توان خالص بهمیزان ۷۶٪ نسبت به حالت پایه افزایش داشته است.

## منابع

- [۱] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, (۲۰۲۱). "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. ۱۳۶, pp. ۱-۹. doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01071-1](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01071-1).
- [۲] M. Yadegari, (). "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. ۱۳۶, no. ۱۰, p. ۱۰۱۹, Oct. ۲۰۲۱. doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01999-4](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01999-4).
- [۳] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha. (۲۰۲۵), "Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Peugeot ۲۰۶ Radiator Using Oxide Nanofluids," *Sci. Technol. Mech. Eng.* Article ID: e۲۲۱۶۲۴. doi: [10.22034/stme.2020.510147.1117](https://doi.org/10.22034/stme.2020.510147.1117).
- [۴] H. Pourmirzaagha, R. Ebrahimi, and A. B. Ansari. (۲۰۱۷), "Energy and exergy analysis of gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell," *J. Model. Eng.*, vol. ۱۰, no. ۰۱, pp. ۳۱۹-۳۳۰. doi: [10.22075/jme.2017.2848](https://doi.org/10.22075/jme.2017.2848).
- [۵] H. Pourmirzaagha, V. Esfahanian, F. Sabetghadam, and F. Torabi. (۲۰۱۶), "Single and multi-objective optimization for the performance enhancement of lead-acid battery cell," *Int. J. Energy Res.*, vol. ۴۰, no. ۱۴, pp. ۱۹۶۶-۱۹۷۸. doi: [10.1002/er.3574](https://doi.org/10.1002/er.3574).
- [۶] A. F. Massardo and F. Lubelli. (۲۰۰۰), "Internal reforming solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycles (IRSOFC-GT): Part A—Cell model and cycle thermodynamic analysis," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. ۱۲۲, no. ۱, pp. ۲۷-۳۰. doi: [10.1115/1.4831187](https://doi.org/10.1115/1.4831187).
- [۷] P. Costamagna, L. Magistri, and A. F. Massardo. (۲۰۰۱), "Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine," *J. Power Sources*, vol. ۹۶, no. ۲, pp. ۳۵۲-۳۶۸. doi: [10.1016/S0378-7788\(00\)00668-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00668-6).
- [۸] W. J. Yang et al. (۲۰۰۷), "Design performance analysis of pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems considering temperature constraints," *J. Power Sources*, vol. ۱۶۰, no. ۱, pp. ۴۶۲-۴۷۳. doi: [10.1016/j.jpowsour.2006.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.018).
- [۹] S. K. Park, K. S. Oh, and T. S. Kim. (۲۰۰۷), "Analysis of the design of a pressurized SOFC hybrid system using a fixed gas turbine design," *J. Power Sources*, vol. ۱۷۰, no. ۱, pp. ۱۳۰-۱۳۹. doi: [10.1016/j.jpowsour.2007.03.067](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.067).
- [۱۰] I. Dincer and M. A. Rosen. (۲۰۰۴), "Exergy as a driver for achieving sustainability," *Int. J. Green Energy*, vol. ۱, no. ۱, pp. ۱-۹. doi: [10.1080/GE-120027881](https://doi.org/10.1080/GE-120027881).
- [۱۱] F. Calise, M. D'Accadia, A. Palombo, and L. Vanoli. (۲۰۰۷), "A detailed one dimensional finite-volume simulation model of a tubular SOFC and a pre-reformer," *Int. J. Thermodyn.*, vol. ۱۰, no. ۳, pp. ۸۷-۹۶.
- [۱۲] F. Calise, A. Palombo, and L. Vanoli. (۲۰۰۷), "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant," *J. Power Sources*, vol. ۱۵۸, no. ۱, pp. ۲۲۵-۲۴۴. doi: [10.1016/j.jpowsour.2005.07.088](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.07.088).

- [۱۳] M. Granovskii, I. Dincer, and M. A. Rosen. (۲۰۰۸), "Exergy analysis of a gas turbine cycle with steam generation for methane conversion within solid oxide fuel cells," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. ۱۳۰, no. ۲, pp. ۰۲۱۸۰۱-۰۲۱۸۰۱-۷. doi: [10.1115/1.2894479](https://doi.org/10.1115/1.2894479).
- [۱۴] S. Motahar and A. A. Alebrahim. (۲۰۰۹), "Exergy based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. ۳۴, no. ۹, pp. ۲۳۹۶-۲۴۰۷. doi: [10.1016/j.ijhydene.2008.12.070](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.070).
- [۱۵] H. Noorbakhsh, M. H. Manesh, and M. Amidpour, (۲۰۲۴). "Novel heavy fuel oil based IGCC polygeneration system based on integration with ejector cooling and heat recovery of the solid oxide fuel cell in adsorption desalination," *Energy*, vol. ۳۱۲, p. ۱۳۳۴۸۸. doi: [10.1016/j.energy.2024.133488](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133488).
- [۱۶] S. Li et al. (۲۰۲۰), "A multi-objective analysis for enhanced energy and exergy performances of an integrated compressed air energy storage system using the meta-heuristic whale optimization algorithm," *J. Energy Storage*, vol. ۱۰۵, p. ۱۱۴۶۸۱. doi: [10.1016/j.est.2024.114681](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114681).
- [۱۷] M. Gandiglio, A. Lanzini, P. Leone, M. Santarelli, and R. Borchiellini. (۲۰۱۳), "Thermoeconomic analysis of large solid oxide fuel cell plants: Atmospheric vs. pressurized performance," *Energy*, vol. ۵۵, pp. ۱۴۲-۱۵۰.
- [۱۸] S. Hosseini, J. Pirkandi, and Z. P. Moziraji. (۲۰۲۰), "Thermo-Economic Analysis of Triple Production System, Combination with Solid Oxide Fuel Cell and Absorption Chiller," *Hydrogen, Fuel Cell & Energy Storage*, vol. ۱۲, no. ۱, pp. ۵۹-۷۴. doi: [10.22104/hfe.2024.7421.1308](https://doi.org/10.22104/hfe.2024.7421.1308).
- [۱۹] Y. Haseli, I. Dincer, and G. F. Naterer. (۲۰۰۸), "Thermodynamic modeling of a gas turbine cycle combined with a solid oxide fuel cell," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. ۳۳, no. ۲۰, pp. ۵۸۱۱-۵۸۲۲. doi: [10.1016/j.ijhydene.2008.08.036](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.036).
- [۲۰] Y. Haseli, I. Dincer, and G. F. Naterer. (۲۰۰۸), "Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power system with a solid oxide fuel cell through exergy," *Thermochim. Acta*, vol. 481, no. ۱-۲, pp. ۱-۹. doi: [10.1016/j.tca.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.09.007).
- [۲۱] H. I. Saravanamuttoo, G. F. Rogers, and H. Cohen. (۲۰۰۱), *Gas Turbine Theory*, Pearson Education.
- [۲۲] Rao, S. (۱۹۹۶). "Engineering optimization theory and practice", ۳<sup>rd</sup> Edition, A Wiley-Interscience Publication.
- [۲۳] Chelouah, R., Siarry, P. (۲۰۰۴). "Genetic and Nelder-Mead algorithm hybridized for a more accurate global optimization of continuous multimimima functions". *European J of Operational Research*.
- [۲۴] S. J. Chen and C. L. Hwang. (۱۹۹۲), "Fuzzy multiple attribute decision making methods," in *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Berlin, Germany: Springer, pp. ۲۸۹-۴۸۶.

## Optimization of Gas Turbine Combined with Solid Oxide Fuel Cell Cycle Using Hybrid Optimization Algorithm Based on Simplex and Genetic Algorithms

Hamoon Pourmirzaagha

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ram.C., Islamic Azad University, Ramsar, Iran  
[Hamoon.pourmirzaagha@iau.ac.ir](mailto:Hamoon.pourmirzaagha@iau.ac.ir)

---

Received:

**Abstract:** This paper presents the optimization of gas turbine combined with solid oxide fuel cell using the hybrid algorithm based on simplex and genetic optimization algorithms. Initially, all components of the system are modeled separately using thermodynamically based correlations and an electrochemical analysis of fuel cell is presented. Comparison of the obtained results shows excellent agreements with previous studies. The effects of various parameters on the performance of cycle are analyzed. Moreover, the proposed algorithm is formulated with a new motivation for optimization of the system. When genetic algorithm finds the optimum points, simplex searches through the optimal points to find the best local points and then to localize a promising area, likely to contain a global minimum, it is necessary to well exploration the whole search domain. The proposed hybrid algorithm is applied to popular benchmark functions and its performance is compared with other optimization algorithms as accuracy. Exergetic and thermal efficiency and net power are three objective functions. The simulation results show that the efficiency of hybrid system with optimization module is  $\approx 5\%$ , although, the net power increases  $\approx 1\%$  with respect to basic module.

Accepted:

Keywords:

Heuristic optimization algorithm, Hybrid algorithm, Simplex genetic algorithm, Gas turbine, Solid oxide fuel cell