

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

هامون پورمیرزاآقا

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 بر پایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک پرداخته شده است. ابتدا کلیه اجزای سیکل ترکیبی، جداگانه به کمک روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و برای پیل سوختی 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 انرژی 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

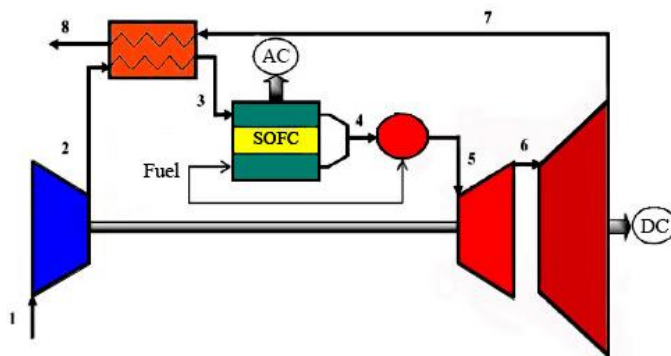
افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است [۱-۳]. با توجه به روند روبه‌رشد مصرف انرژی در جهان استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی پایین‌تر در اولویت قرار گرفته‌است. امروزه، باگسترش سیستم‌های مختلف تولید انرژی، روش‌های گوناگونی مانند 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، الکتروسیته و گرما تولید می‌کند. پیل سوختی، نسبتاً آرام و بی‌صداست، به همین دلیل جهت تولید برق محلی مناسب می‌باشد [۴]. همچنین پیل سوختی به عنوان یک فن‌آوری 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 محفظه احتراق، بازده در حدود ۳۰٪ تا ۳۵٪ است. از میان انواع پیل سوختی، نوع اکسید جامد به دلیل راندمان بالا، آلودگی کم، تنوع سوخت مصرفی و از همه مهم‌تر دمای بالای گاز خروجی، بهترین گزینه برای استفاده در توربین‌های 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 برمی‌گردد. مفهوم به کارگیری توربین‌های گازی 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 توسط آن‌ها، عملکرد پیل را در حالت یکنواخت و پایدار شبیه‌سازی می‌کرد. کاستامگنا و همکاران [۷]، طراحی و عملکرد سیستمی متشکل از میکروتوربین‌های گازی با بازیاب حرارتی و پیل سوختی اکسید جامد دما بالا را مورد آزمایش قرار دادند. یانگ و همکاران [۸] دو سیستم با به‌سازی 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 توربین‌های گازی مشخص بررسی کردند. در بیشتر تحقیقات مذکور، عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی و توربین‌های گازی 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 بررسی قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم و هر یک از اجزای آن می‌پردازد و نرخ برگشت‌ناپذیری را در اجزای سیستم بررسی می‌کند. آنالیز انرژی، 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 بررسی و تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک یک سیکل توربین‌های گازی ترکیبی با پیل سوختی اکسید جامد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیشترین نرخ نابودی انرژی در پیل سوختی رخ می‌دهد. این نرخ نابودی انرژی بالا به خاطر راندمان پایین واکنش شیمیایی است که در پیل سوختی رخ می‌دهد. با وجود راندمان بالای الکترونیکی پیل سوختی، بیشترین نرخ نابودی انرژی در پیل سوختی است که بخاطر تعداد زیاد واکنش‌های شیمیایی و الکترو شیمیایی است. به‌طور مشابه محفظه احتراق نیز به خاطر انجام واکنش شیمیایی نرخ بالای نابودی انرژی را دارد. همچنین نتایج نشان داد که نرخ نابودی انرژی 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 نابودی انرژی را دارد. گرانوسکی و همکارانش [۱۳] نیز به بررسی عملکرد انرژی سیکل ترکیبی پرداختند. آن‌ها نیز مشابه کالیس نشان دادند که بالاترین نرخ نابودی انرژی به ترتیب در پیل سوختی و محفظه احتراق است. اما در مدل آنها اختلاف نرخ نابودی انرژی بین محفظه احتراق و پیل سوختی کمتر از ۵٪ است. صادق مطهر و علی اکبر عالم رجبی [۱۴] به بررسی آنالیز انرژی 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، به‌طور

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

لی و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی راندمان‌های انرژی و انرژی در یک سیستم ترکیبی ذخیره‌سازی هوای فشرده با استفاده از الگوریتم فراابتکاری 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 به دست 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، انرژی، 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 انرژی، هزینه برق را افزایش می‌دهد. هاسلی همکاران [۱۹ و ۲۰]، در دو مطالعه جداگانه، به بررسی تخریب انرژی 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 انرژی به صورت دقیق تحلیل و ارزیابی شده است. در این ساختار، جریان هوا 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 الکترو شیمیایی سبب تولید توان الکتریکی شده و علاوه بر آن حرارت قابل توجهی 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 نیوتن-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 متداول متمایز ساخته است.



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

## ۲. مدل سازی انرژی و انرژی 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 انرژی سیستم و روابط مربوط به آن آورده شده است. برای مدل سازی ترمودینامیکی، فرضیه‌هایی در نظر گرفته شده است که عبارتند از: ۱. کلیه اجزای توربین گاز، آدیاباتیک فرض می‌شوند؛ ۲. جریان سیال در تمام اجزا پایدار است؛ ۳. تغییرات انرژی‌های پتانسیل و جنبشی صفر فرض می‌شود؛ ۴. رفتار تمام گازها به صورت گاز ایده‌آل است؛ ۵. از آثار مربوط به خنک کاری توربین صرف نظر می‌شود.

### مدل سازی کمپرسور

هوای ورودی به کمپرسور، هوای محیط می‌باشد. ترکیب مولی هوا به صورت ۰/۲۱ مول اکسیژن و ۰/۷۹ مول نیتروژن در نظر گرفته شده است. در سیستم‌های ترکیبی هوای فشرده شده توسط کمپرسور، پس از گرم شدن توسط مبدل حرارتی، وارد کاتد پیل سوختی می‌شود. کمپرسور را می‌توان 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 می‌شود، به صورت زیر است:

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

راندمان انرژی کمپرسور نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

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

### مدل سازی مبدل حرارتی

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

$$\mathcal{E}_{recup} = \frac{T_3 - T_2}{T_7 - T_2} \quad (5)$$

قانون اول ترمودینامیک برای مبدل حرارتی به صورت زیر نوشته می‌شود:

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

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

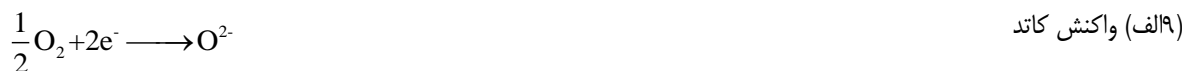
با فرض  $\dot{m}_2 = \dot{m}_3$  و  $\dot{m}_7 = \dot{m}_8$  راندمان انرژی و نرخ نابودی انرژی در مبدل حرارتی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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

### 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] می باشد. واکنش های الکتروشیمیایی در آند و کاتد بر اساس رابطه های زیر رخ می دهد [۴]:



برای محاسبه ولتاژ پیل سوختی از معادله مشهور نرنست که به صورت زیر می باشد، استفاده می شود [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  $E^o$  و  $E$  به ترتیب پتانسیل استاندارد و بیشینه ولتاژ تئوری است که ولتاژ مدار باز نامیده می شود و زمانی که هیچ جریانی در مدار نباشد، ولتاژ پیل برابر آن خواهد بود. همان طور که دیده می شود با افزایش غلظت واکنش دهنده ها بیشینه ولتاژ پیل افزایش می یابد.

### ولتاژ عملکرد پیل سوختی اکسید جامد

وقتی پیل سوختی تحت شرایط عملکردی تولید جریان خارجی کار می کند، مقداری افت ولتاژ در پیل سوختی اتفاق می افتد که باعث می شود ولتاژ خروجی پیل همیشه کمتر از مقدار بیشینه ولتاژ باشد. افت ها که معمولاً پلاریزاسیون نامیده می شوند، عبارت اند از: ۱- پلاریزاسیون فعال سازی، ۲- پلاریزاسیون اهمی، ۳- پلاریزاسیون غلظت. بنابراین ولتاژ اندازه گیری شده در یک پیل سوختی عملی معمولاً از ولتاژ برگشت پذیر کمتر است. ولتاژ عملکرد پیل سوختی پس از محاسبه  $V_{act}$ ،  $V_{ohm}$  و  $V_{con}$  به صورت زیر تعیین می شود:

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

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 می شود.

### پلاریزاسیون فعال سازی

پلاریزاسیون فعال سازی  $V_{act}$  وابسته به سرعت واکنش الکتروشیمیایی بر روی سطح الکتروود است. در واکنش های الکتروشیمیایی نیز مانند واکنش های شیمیایی، واکنشگرها باید از سد انرژی فعال سازی عبور کنند. اتلاف حاصل از پلاریزاسیون فعال سازی در دانسیته جریان پایین قابل ملاحظه است و با افزایش دانسیته جریان به میزان کمی افزایش می یابد. پلاریزاسیون فعال سازی توسط رابطه نیمه تجربی پاتلر — ولمر به صورت زیر بیان می شود [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 تبدالی است و واحد آن  $A/m^2$  می‌باشد. از رابطه (۱۲) نمی‌توان  $V_{act}$  را به‌صورت مستقیم به دست آورد، اما برای پیل‌های سوختی با الکتروود هیدروژن مقدار  $\alpha$  برابر  $0.5$  فرض می‌شود و خواهیم داشت [۴ و ۱۴]:

$$V_{act} = \frac{2RT}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_0} \right) \quad (13)$$

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

$$i_{o,an} = \gamma_{an} \left( \frac{P_{H_2}}{P_{ref}} \right) \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp \left( -\frac{E_{act,an}}{RT} \right) \quad (14)$$

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

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

### پلاریزاسیون اهمی

این افت ولتاژ، نتیجه مقاومت الکتروودها و صفحات اتصال دهنده در برابر جریان الکترون‌ها و مقاومت الکتروولیت در برابر جریان یون‌هاست. از آنجاکه این افت ولتاژ به‌صورت مستقیم با دانسیته جریان پیل متناسب است، به آن پلاریزاسیون اهمی گفته می‌شود. با افزایش دانسیته 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 به‌صورت 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  $0.13$  و  $0.18$  می‌باشد.  $\rho$  و  $d$  نیز به ترتیب، مقاومت ویژه وضخامت 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 به‌دست می‌آید [۱۴]:

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

که ثابت‌های  $a$ ،  $b$  و  $d$  معادله (۲۰) براساس مرجع [۱۴] آمده‌است.

### پلاریزاسیون غلظت

اگر واکنشگرها به مقدار کافی به الکتروود نرسد، نوعی افت در میزان پتانسیل در الکتروود 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 الکتروود به محل انجام واکنش انتقال یابند. در این حالت، مکانیزم غالب انتقال، نفوذ است. به‌علاوه، محصولات واکنش الکترو شیمیایی 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 گرادیان غلظت مؤثرند از جمله: نفوذ آهسته واکنشگرهای گازی در حفره‌های کاتالیست، انحلال واکنشگرها در الکترولیت، خروج آهسته محصول واکنش از الکترولیت. در عمل انتقال کند واکنشگرها 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 روبه‌رو 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 تغذیه 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  $i_L$ ، برابر  $9000 \frac{A}{M^2}$  استفاده شده است [۴]. نرخ جریان مولی هیدروژن در واکنش الکتروشیمیایی 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

$U_f$  و  $U_a$  به ترتیب فاکتور مصرف سوخت و هوا می‌باشد. اکنون پس از محاسبه 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 رامی‌توان 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 انرژی و نرخ نابودی انرژی در پیل سوختی به صورت زیر است:

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

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

### محفظه احتراق

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

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

نرخ نابودی انرژی 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 سبکل ترکیبی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{fuel,FC} \cdot U_f \cdot LHV_{H_2} + \dot{Q}_{comb} - \dot{m}_8 h_8 - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{surr} - \dot{W}_{Fc,dc} - \dot{W}_{PT} = 0 \quad (39)$$

که  $\dot{Q}_{comb}$  گرمای تولیدی در محفظه احتراق و  $\dot{Q}_{loss}$  گرمای هدررفته می‌باشد. راندمان حرارتی سبکل 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:

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

$\dot{W}_{net}$  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)،  $\dot{W}_{Fc,Ac}$  و  $\dot{W}_{T,Gen}$  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 انرژی 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 انرژی 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 رابطه‌ی بالا نرخ نابودی انرژی 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 پارامترهای 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 دقت 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 آغاز گردید. این رویکردها شامل الگوریتم‌هایی است که صریحاً یا به طور ضمنی تقابل بین ایجاد تنوع جستجو<sup>۱</sup> (وقتی علائمی 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 مورد بررسی پیدا کند) را مدیریت می‌کنند. از بین این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی، آنیل شبیه‌سازی شده، جستجوی ممنوع، بهینه‌سازی جمعیت ذرات، بهینه‌سازی کلونی مورچگان و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد. معروفترین و کاراترین این رویکردها الگوریتم‌هایی است که با الگوبرداری از تکامل ژنتیکی، الگوهایی برای حل مسئله ارائه می‌کنند. این الگوریتم‌ها یک روش جستجوی مؤثر در فضاها بسیار بزرگ ایجاد می‌کنند که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن جواب بهینه می‌گردد.

<sup>۱</sup> Exploration  
<sup>۲</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 توسط 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 با شد، سیمپلکس می‌گویند- در اطراف جواب بهینه تولید می‌شود و با ضرایبی که وجود دارد سیمپلکس با انقباض و انقباض مواجه می‌شود تا این که به جواب بهینه نزدیک شود. بنابراین، استفاده از فرمولاسیون 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  $\mathbf{x}_0$  نقطه شروع اولیه،  $\mathbf{u}_s$  بردار یکه در امتداد مختصات  $j$ ام است که  $p$  و  $q$  به صورت زیر تعریف می‌گردند:

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

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

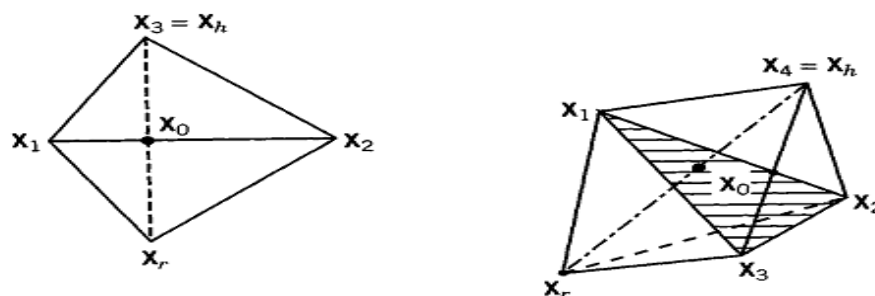
که در روابط بالا  $a$  طول ضلع سیمپلکس است. حرکت الگوریتم سیمپلکس برای رسیدن به نقطه بهینه توسط سه عملگر (انعکاس، انقباض و انبساط) صورت می‌گیرد که معادله حاصله از آن در ادامه تبیین شده است:

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

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

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

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



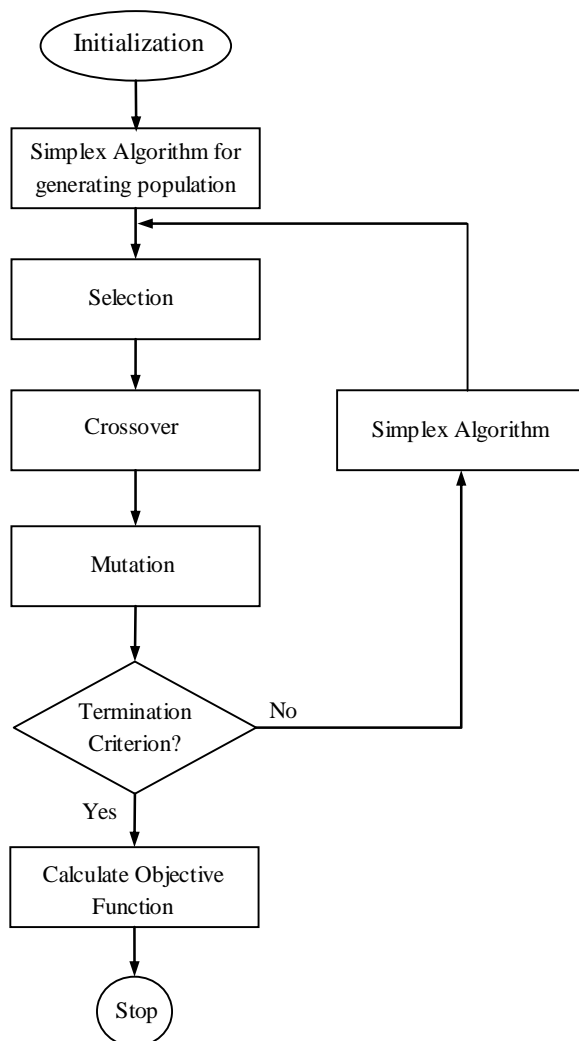
شکل ۲. انعکاس سیمپلکس [۳۴]

## 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 پرفسور هالند مطرح شد و توسط جمعی از دانشجویانش چون گلدبرگ توسعه یافت [۲۲ و ۲۳]. بر اساس نظریه تکاملی داروین آن دسته از صفات طبیعی که با قوانین طبیعی سازگاری بیشتری دارند، شانس 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 آنهایی 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 تکاملی‌اند 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

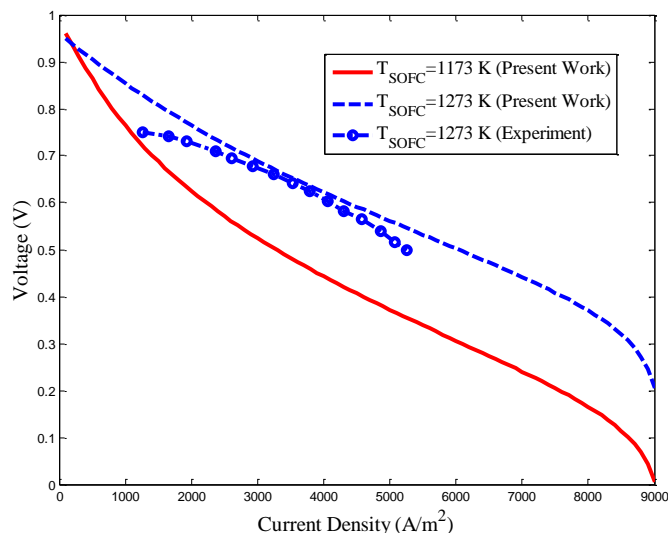
الگوریتم ژنتیک-سیمپلکس یک الگوریتم ابتکاری ترکیبی است. در این الگوریتم، الگوریتم سیمپلکس وظیفه شناسایی افراد برجسته جمعیت و الگوریتم ژنتیک وظیفه استخراج جواب بهینه را بر عهده دارد. نحوه کارکرد این الگوریتم به این صورت است که ابتدا یک نسل، توسط الگوریتم سیمپلکس برای الگوریتم ژنتیک ایجاد می‌شود، این نسل 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. فلوجارت الگوریتم سیمپلکس - ژنتیک

## ۵. نتایج

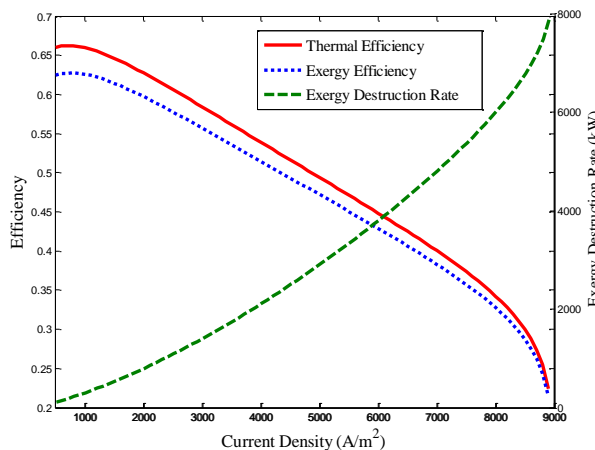
برای اعتبارسنجی مدل سازی پیل، نتایج عددی با نتایج تجربی مرجع [۲۵] مقایسه شده است. مطابق با شکل (۴) افزایش دمای پیل سوختی اکسید جامد، باعث افزایش ولتاژ آن می شود. در داده های تجربی نیز روند مشابهی وجود دارد و درستی نتایج را تأیید می کند، اما اختلاف ناچیز ایجاد شده ناشی از عوامل مختلفی است. در عمل فرآیند الکتروشیمیایی شامل مکانیزم پیچیده ای است. مدل سازی هر کدام از افت ها خود نیازمند در نظر گرفتن رفتارهای مولکولی اجزای واکنش دهنده می باشد. همچنین در مدلی که در تحقیق در نظر گرفته شده است، همانند مدل های قبلی، از توزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی روی پیل سوختی، اختلاف دما و فشار بین ورودی و خروجی آند و کاتد، 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.



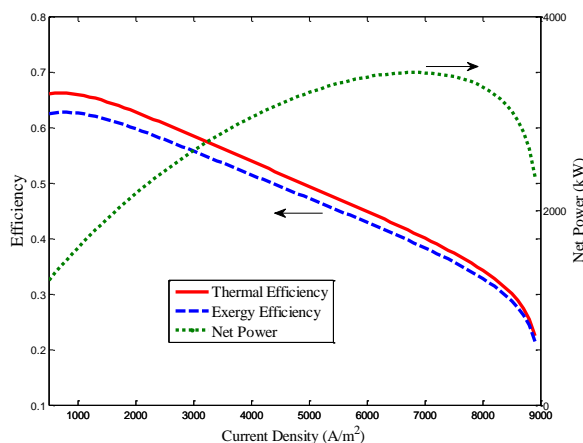
شکل ۴. نمودار ولتاژ پیل سوختی بر حسب چگالی جریان و مقایسه با مقدار تجربی [۱۴] در دمای ۱۲۷۳ کلون

### 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 انرژی ترکیبی می‌شود، زیرا با افزایش شدت جریان، نرخ سوخت ورودی به پیل سوختی افزایش می‌یابد و به دلیل زیاد بودن ارزش حرارتی سوخت ورودی در رابطه راندمان، راندمان سیستم کاهش می‌یابد. شکل (۵-ب) اثر شدت جریان بر راندمان سیستم و نرخ نابودی انرژی را نشان می‌دهد. در اثر افزایش شدت جریان میزان نرخ نابودی انرژی افزایش می‌یابد. افزایش شدت جریان در واقع به معنای افزایش میزان انرژی و افزایش میزان نرخ انتقال حرارت و در نتیجه افزایش میزان نابودی انرژی 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 انرژی می‌باشد.



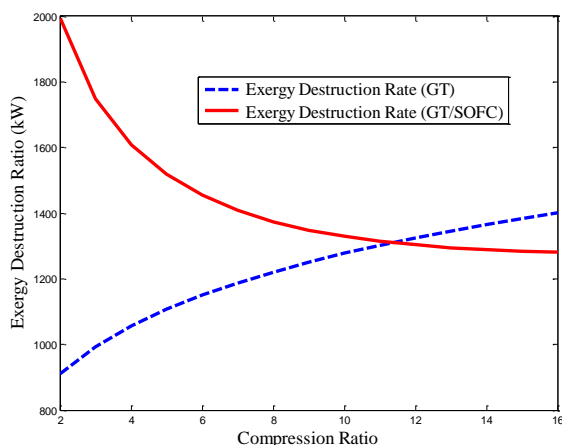
(ب)



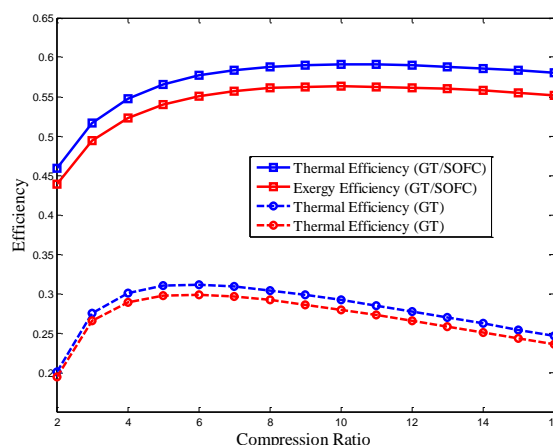
(الف)

**شکل ۵.** تاثیر شدت جریان (الف) بر راندمان حرارتی، راندمان انرژی و توان تولیدی سیکل ترکیبی، (ب) بر راندمان حرارتی، راندمان انرژی و نرخ نابودی انرژی سیستم ترکیبی

شکل (۶-الف) عملکرد فوق العاده سیکل ترکیبی در مقایسه با سیستم معمولی را نشان می دهد. یکی از عللی که باعث می شود پیل سوختی دما بالا استفاده شود، این است که سیال در حال کار قبل از ورود به محفظه احتراق را پیش گرم می کند و همچنین باعث تولید انرژی بیشتر می شود. هر دو عامل باعث افزایش انرژی در مقایسه با حالت معمولی می شود. بر اساس مقادیر پیش بینی شده در شکل (۶-الف)، سیکل ترکیبی ۲۷/۴۵ 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 ۱۲۵۰ درجه کلوین بر نرخ نابودی انرژی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود افزایش فشار در سیستم ترکیبی به علت آنکه باعث افزایش توان پیل سوختی می شود و چون در سیستم های ترکیبی با پیل سوختی عمده توان را پیل سوختی تامین می نماید، میزان نرخ نابودی انرژی در سیستم در مقابل سیستم بدون پیل سوختی کاهش می دهد. در سیستم بدون پیل سوختی افزایش فشار به معنای افزایش کار بیشتر کمپرسور می باشد و در نتیجه میزان برگشت ناپذیری در سیستم را افزایش می دهد.



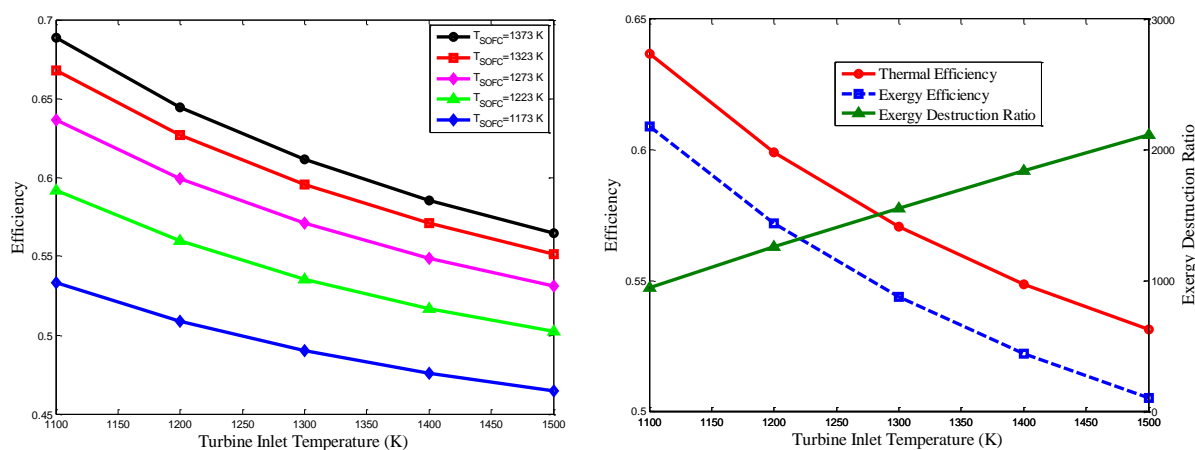
(ب)



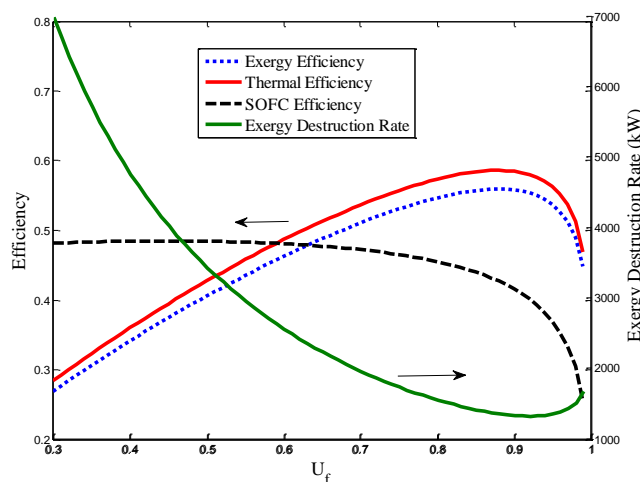
(الف)

**شکل ۶.** اثر نسبت فشار (الف) بر راندمان حرارتی و انرژی و توان تولیدی سیکل ترکیبی و بدون پیل سوختی (ب) بر نرخ نابودی انرژی در سیستم ترکیبی با پیل سوختی و بدون پیل سوختی

اثر درجه حرارت توربین بر راندمان حرارتی و انرژی و نرخ نابودی انرژی را در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. هنگامی که دمای ورودی توربین افزایش می‌یابد، در راندمان حرارتی و انرژی 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 عمده 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 نتیجه بالا بودن هدردهی انرژی در طی فرآیند احتراق، باعث افزایش نرخ نابودی انرژی سیستم ترکیبی می‌شود. شکل (۷-ب) اثر راندمان حرارتی در اثر افزایش دمای ورودی به توربین در دماهای 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 انرژی کل سیستم و راندمان حرارتی و انرژی 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 انرژی و نرخ نابودی انرژی سیستم ترکیبی نسبت به دمای ورودی به توربین مختلف، ب) راندمان حرارتی سیستم ترکیبی نسبت به دمای ورودی به توربین در دماهای مختلف عملکردی پیل سوختی

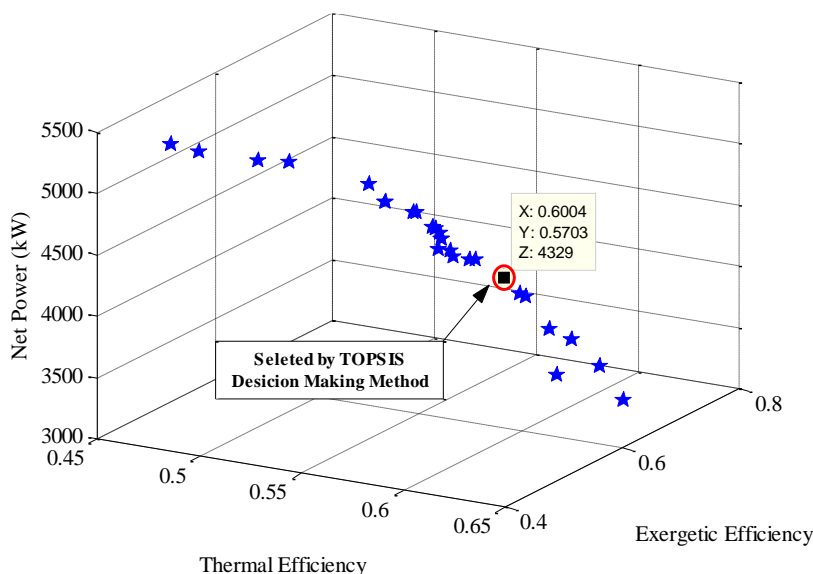


شکل ۸. اثر فاکتور مصرف سوخت بر راندمان پیل سوختی و راندمان حرارتی و انرژی و توان تولیدی سیکل ترکیبی

## 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 انرژی و توان خالص است و متغیرهای طراحی عبارتند از: 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. همانطور که در جبهه 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 آن‌را 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.

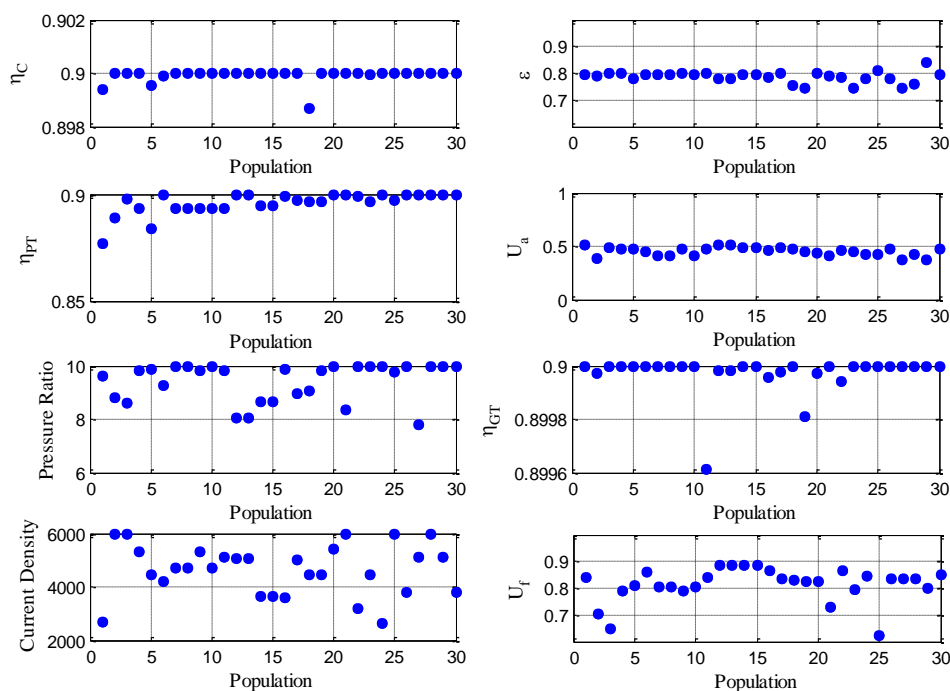


شکل ۹. جبهه بهینه پرتو بدست آمده از روش بهینه‌ابتکاری برای سیکل ترکیبی

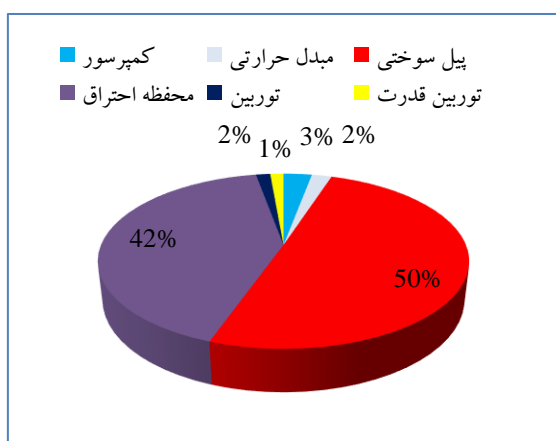
جدول ۱ نتایج حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس انتخاب مناسب‌ترین نقطه به روش TOPSIS را با نتایج حالت پایه نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۰) توزیع پارامترهای طراحی را در جبهه پرتو نشان می‌دهد. شکل (۱۱) میزان درصد نابودی انرژی در اجزای مختلف سیکل ترکیبی در حالت پایه و بهینه شده را نشان می‌دهد. در هر دو حالت 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 انرژی 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

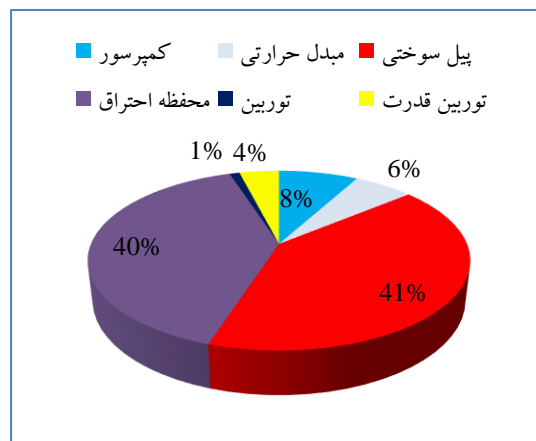
| $\eta_{GT}$ | $U_f$ | I    | $U_a$ | $R_p$ | $\eta_{PT}$ | $\varepsilon$ | $\eta_c$ | متغیرهای طراحی |
|-------------|-------|------|-------|-------|-------------|---------------|----------|----------------|
| ۰/۸۴        | ۰/۸۵  | ۳۰۰۰ | ۰/۲۵  | ۴     | ۰/۸۹        | ۰/۸           | ۰/۸۱     | حالت 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



(ب)



(الف)

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

## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله با بکارگیری یک الگوریتم بهینه یی شنهادی بر پایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک، بهینه سازی سیکل توربین گاز مجهز به پیل سوختی اکسید جامد انجام شده است. در ابتدا به منظور یافتن پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سیستم یک آنالیز پارامتریک صورت گرفت. سه تابع هدف راندمان حرارتی و اگزرژی 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 مناسب ترین نقطه در جبهه پرتو دارای راندمان حرارتی ۶۰٪، در حالیکه توان خالص به میزان 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: ۱۰,۱۱۴۰/epjp/s۱۳۳۶۰-۰۲۱-۰۱۰۷۱-۱.
- [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: ۱۰,۱۱۴۰/epjp/s۱۳۳۶۰-۰۲۱-۰۱۹۹۹-۴.
- [۳] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha. (۲۰۲۰), "Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Peugeot ۲۰۶ Radiator Using Oxide Nanofluids," *Sci. Technol. Mech. Eng.* Article ID: e۲۲۱۶۲۴. doi: ۱۰,۲۲۰۳۴/stme.۲۰۲۰,۰۱۰۱۴۷,۱۱۱۷.
- [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: ۱۰,۲۲۰۷۵/jme.۲۰۱۷,۲۸۴۸.
- [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: ۱۰,۱۰۰۲/er.۳۰۷۴.
- [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: ۱۰,۱۱۱۵/۱,۴۸۳۱۸۷.
- [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. ۱۶, no. ۲, pp. ۳۰۲-۳۱۸. doi: ۱۰,۱۰۱۶/S۰۳۷۸-۲۷۰۳(۰۰)۰۰۶۶۸-۶.
- [۸] W. J. Yang et al. (۲۰۰۶), "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: ۱۰,۱۰۱۶/j.jpowsour.۲۰۰۶,۰۱,۰۱۸.
- [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: ۱۰,۱۰۱۶/j.jpowsour.۲۰۰۷,۰۳,۰۶۷.
- [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: ۱۰,۱۰۸۱/GE-۱۲۰۰۲۷۸۸۱.
- [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. (۲۰۰۶), "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant," *J. Power Sources*, vol. ۱۵۸, no. ۱, pp. ۲۲۰-۲۴۴. doi: ۱۰,۱۰۱۶/j.jpowsour.۲۰۰۵,۰۷,۰۸۸.

- [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: [10.1115/1.2894469](https://doi.org/10.1115/1.2894469).
- [۱۴] S. Motahar and A. A. Alemrajabi. (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. ۰, pp. ۲۳۹۶-۲۴۰۷. doi: [10.1016/j.ijhydene.2008.12.060](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.060).
- [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. ۱۰۰, 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. ۵۰, 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. ۰۹-۷۴. doi: [10.22104/hfe.2024.7021.1308](https://doi.org/10.22104/hfe.2024.7021.1308).
- [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.2008.05.036](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.036).
- [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. ۴۸۰, 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. (۲۰۰۳). "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:**

**Accepted:**

**Keywords:**

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

---

**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 ۶۰%, although, the net power increases ۷٪ with respect to basic module.

---