نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۱-۲۰

بهینه‌سازی سیکل توربین‌گازی مجهز به پیل سوختی اکسید جامدلوله‌ای 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

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۴/۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۶/۱۵

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

در این مقاله بهینه‌سازی سیکل توربین‌گاز مجهز به پیل‌سوختی اکسیدجامد لوله‌ای با سوخت هیدروژن با بکارگیری یک الگوریتم بهینه هیبریدی پیشنهادی برپایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک پرداخته شده‌است. ابتدا کلیهٔ اجزای سیکل ترکیبی، جداگانه به‌کمک روابط ترمودینامیکی مدل‌سازی شده و برای پیل-سوختی یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا انجام شده‌است. نتایج حاضر با نتایج مراجع معتبر مقایسه شده و مطابقت خوبی مشاهده شده‌است. همچنین یک تحلیل پارامتریک به‌منظور یافتن پارامترهای تاثیرگذار درسیکل انجام گرفته‌است. در ادامه جهت بهینه‌سازی یک الگوریتم پیشنهادی با استفاده از یک سری ایده، ارائه شده‌است؛ به این صورت، زمانی‌که 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 پیاده‌سازی‌شده و عملکرد آن با الگوریتم‌های بهینه‌ساز دیگر مقایسه شده‌است که دقت بالاتر الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، برای سه تابع هدف (راندمان حرارتی، راندمان اگزرژی 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 حالی‌که توان خالص سیستم به‌میزان ۷۶٪ نسبت به‌حالت پایه افزایش می‌یابد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۱-۲۰

۱.مقدمه

افزایش راندمان و بهبود م صرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده ا ست [۱-۳]. باتوجه به روند روبهر شد م صرف انرژی درجهان استفاده ازروش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلایندگی 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 قرارگرفته‌اندکه هر کدام ازاین روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خودند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد،کم هزینه وهمیشه 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 گرما تولید می‌کند. پیل سوختی، نسبتاً آرام و بی صدا ست، به همین دلیل جهت تولید برق محلی مناسب می‌باشد[۴]. همچنین پیل سوختی به عنوان یک فن‌آوری نوین برای تولید توان در توربین‌های‌گازی به کار گرفته و باعث افزایش بازده تا ۶۰٪ می‌شود، در حالی که در توربین‌های گازی معمولی، به علت تلفات زیاد در محفظهٔ 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 توربین گازی به شمار می‌رود. به همین دلیل در سال‌های اخیر، این تکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته ا ست [۵]. گرچه تحقیقات در زمینهٔ پیل سوختی اکسید جامد از اواخر دههٔ ۵۰ میلادی آغاز گردید، ولی نتایج یک مدل سادهٔ پیل سوختی اکسید جامد در اواسط دههٔ ۸۰ منتشر شد؛ لذا اولین مقالات در زمینهٔ سیستم‌های ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد به اوایل دههٔ ۹۰ برمی‌گردد. مفهوم به کارگیری 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 مطالعهٔ مفهومی دربارهٔ بررسی عملکرد سیکل ترکیبی انجام دادند. مدل ریا ضی ارائه شده تو سط آن‌ها، عملکرد پیل را در حالت یکنواخت و پایدار شبیه سازی می‌کرد. کا ستامگنا و همکاران[۷]، طراحی و عملکرد سیستمی متشکل 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 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 وهمکاران[۹]، مشخصات طراحی و عملکرد یک سیستم ترکیبی را با در نظر گرفتن یک توربین گاز مشخص بررسی کردند.دربیشتر 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 برر سی قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم و هر یک از اجزای آن می‌پردازد و نرخ برگشت‌ناپذیری را در اجزای سیستم برر سی می‌کند. آنالیز اگزرژی، 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 ا ستفاده می‌کند.کالیس و همکارانش [۱۱و ۱۲] به برر 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 اگزرژی در پیل سوختی رخ می‌دهد. این نرخ نابودی اگزرژی بالا به خاطر راندمان پایین واکنش شیمیایی است که در پیل سوختی رخ می‌دهد. با وجود راندمان بالای الکتریکی پیل سوختی، بیشترین نرخ نابودی اگزرژی در پیل سوختی است که بخاطر تعداد زیاد واکنش‌های شیمیایی و الکترو شیمیایی ا ست. به‌طور م شابه محفظه احتراق نیز به خاطر انجام واکنش شیمیایی نرخ بالای نابودی اگزرژی را دارد. همچنین نتایج نشان داد که نرخ نابودی اگزرژی 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 سیستم های هیبریدی، باید نگاه اصلی بر روی اجزایی باشد که بالاترین نرخ نابودی اگزرژی را دارد. گرانو سکی و همکارانش[۱۳] نیز به برر سی عملکرد اگزرژی سیکل ترکیبی پرداختند.آن‌ها نیز م شابه کالیس ن شان دادند که بالاترین نرخ نابودی اگزرژی به ترتیب در پیل سوختی و محفظه احتراق است. اما در مدل آنها اختلاف نرخ نابودی اگزرژیبین محفظه احتراق وپیل سوختی کمتر از ۵٪ ا ست. صادق مطهر و علی اکبر عالم رجبی [۱۴] به برر سی آنالیز اگزرژی 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

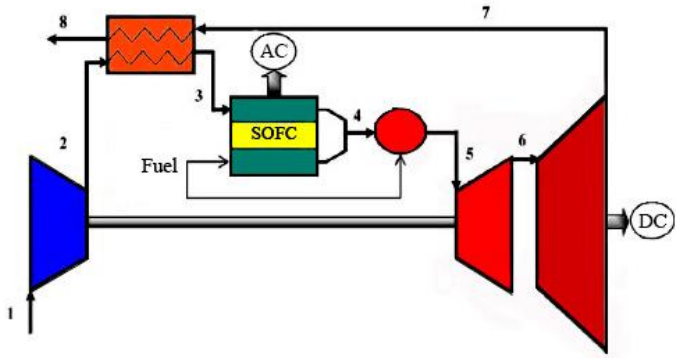
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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

لی و همکاران [۱۶] به بهینه‌سازی راندمان‌های انرژی و اگزرژی 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 به‌دست 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، اگزرژی، 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 اگزرژی، هزینه برق را افزایش می‌دهد. هاسلی همکاران [۱۹ و ۲۰]، در دو مطالعهٔ جداگانه، به بررسی تخریب اگزرژی 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 ارائه‌شده در شکل (۱) از منظر انرژی و اگزرژی به‌صورت دقیق تحلیل و ارزیابی شده است. در این ساختار، جریان هوا ابتدا وارد کمپر سور شده و پس از تراکم، به مبدل حرارتی هدایت می‌گردد. در مبدل حرارتی، دمای هوای فشرده افزایش یافته و سپس وارد پیل سوختی می شود. در پیل سوختی، واکنش‌های الکترو شیمیایی سبب تولید توان الکتریکی شده و علاوه بر آن حرارت قابل‌توجهی نیز آزاد می شود. 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 به‌صورت کار مکانیکی برای چرخاندن کمپرسور و تولید توان مفید آزاد می‌کنند. در ادامه، گازهای خروجی از توربین اصلی وارد توربین قدرت می شوند 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. به‌منظور 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. نمایی از سیستم ترکیبی توربین‌گاز با پیل سوختی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۲. مدل‌سازی انرژی و اگزرژی اجزاء سیستم ترکیبی

در این قسمت، معادلات حاکم بر اجزای سیکل ترکیبی توربین‌گاز با پیل سوختی اکسید جامد جهت مدل‌سازی ترمودینامیکی آورده شده است. در ادامه نیز آنالیز اگزرژی سیستم و روابط مربوط به آن آورده شده است. برای مدل‌سازی ترمودینـامیکی، فرضیه‌هایی در نـظر گرفتـه شده است که عبارتنداز: ۱.کلیـهٔاجـزای توربیـن گاز، آدیاباتیـک فـرض 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 خنک‌کاری توربین صرف‌نظر می‌شود.

مدل‌سازی کمپرسور

هوای ورودی به کمپر سور، هوای محیط می‌با شد. ترکیب مولی هوا به صورت ۰/۲۱ مول اک سیژن و ۰/۷۹ مول نیتروژن در نظر گرفته شده ا ست. در سیستم‌های ترکیبی هوای فشرده شده تو سط کمپر سور، پس از گرم شدن تو سط مبدل حرارتی، وارد کاتد پیل سوختی می شود. کمپرسور را می‌توان به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفت؛ بنابراین، رابطهٔ قانون اول برای آن به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{w}_c = \dot{m}_2 h_2 \quad (۱)$$

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

$$\dot{w}_c = \dot{m}_1 \left(h_2 - h_1 \right) \quad (۲)$$

راندمان اگزرژی کمپرسور نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{exe,C} = \frac{\dot{m}_1 (e_{x2} - e_{x1})}{\dot{w}_c} \quad (۳)$$

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

$$\dot{E}_{x,dest,c} = \dot{w}_c - \dot{m}_1 (e_{x2} - e_{x1}) \quad (۴)$$

مدل‌سازی مبدل حرارتی

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

$$\varepsilon_{recup} = \frac{T_3 - T_2}{T_7 - T_2} \quad (۵)$$

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

$$\dot{m}_2 \left(h_3 - h_2 \right) = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (۶)$$

از رابطهٔ بالا برای محاسبهٔ دمای گازهای گرم خروجی از سیکل می‌توان استفاده کرد.

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$\eta_{exe,Recup} = \frac{\dot{m}_3(e_{x3} - e_{x2})}{\dot{m}_7(e_{x7} - e_{x8})} \quad (۷)$$

$$\dot{E}_{X,dest,Recup} = \dot{m}_7(e_{x7} - e_{x8}) - \dot{m}_3(e_{x3} - e_{x2}) \quad (۸)$$

مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد

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

(۹الف) واکنش کاتد $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \longrightarrow O^{2-}$

(۹ب) واکنش آند $H_2 + O^{2-} \longrightarrow H_2O + 2e^-$

(۹پ) واکنش کلی $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$

برای محاسبهٔ ولتاژ پیل سوختی از معادلهٔ مشهور نرنست که به‌صورت زیر می‌باشد، استفاده می‌شود [۱۴]:

$$E = E^o - \frac{RT}{n_e F}\ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (۱۰)$$

که E^o و E به‌ترتیب پتانسیل استاندارد و بیشینهٔ ولتاژ تئوری 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 بیشینهٔ ولتاژ پیل افزایش می‌یابد.

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 بیشینهٔ ولتاژ باشد. افت‌ها که معمولاً پلاریزاسیون نامیده می‌شوند، عبارت‌اند از: ۱- پلاریزاسیون فعال‌سازی، ۲- پلاریزاسیون اهمی، ۳- پلاریزاسیون غلظت. بنابراین ولتاژ اندازه‌گیری‌شده در یک پیل سوختی عملی معمولاً از ولتاژ برگشت‌پذیر کمتر است. ولتاژ عملکرد پیل سوختی پس از محاسبهٔ V_{act}، V_{ohm} و V_{con} به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (۱۱)$$

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

پلاریزاسیون فعال‌سازی

پلاریزاسیون فعال سازی V_{act} وابسته به سرعت واکنش الکترو شیمیایی بر روی سطح الکترود است. در واکنش‌های الکترو شیمیایی نیز مانند واکنش‌های شیمیایی، واکنشگرها باید از سد انرژی فعال سازی عبور کنند. اتلاف حاصل از پلاریزاسیون فعال سازی در دانسیتهٔ جریان پایین قابل ملاحظه است و با افزایش دانسیتهٔ جریان به‌میزان کمی افزایش می‌یابد. پلاریزاسیون فعال‌سازی توسط رابطهٔ نیمه‌تجربی پاتلر- ولمر به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$i = i_o\left\{\exp\left(\alpha\frac{n_e F}{RT}V_{act}\right) - \exp\left[-(1-\alpha)\frac{n_e F}{RT}V_{act}\right]\right\} \quad (۱۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

که i چگالی جریان تبادلی است و واحد آن A/m^2 می‌باشد. از رابطهٔ (۱۲) نمی‌توان V_{act} را به‌صورت مستقیم به دست آورد، اما برای پیل‌های سوختی با الکترود هیدروژن مقدار α برابر ۰/۵ فرض می‌شود و خواهیم داشت [۴ و ۱۴]:

$$V_{act} = \frac{2RT}{n_e F}\sinh^{-1}\left(\frac{i}{2i_o}\right) \quad (۱۳)$$

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

$$i_{o,an} = \gamma_{an}\left(\frac{P_{H_2}}{P_{ref}}\right)\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{ref}}\right)\exp\left(-\frac{E_{act,an}}{RT}\right) \quad (۱۴)$$

$$i_{o,ca} = \gamma_{ca}\left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}}\right)^{0.25}\exp\left(-\frac{E_{act,ca}}{RT}\right) \quad (۱۵)$$

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

پلاریزاسیون اهمی

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

$$V_{ohm,an} = \frac{i\rho_{an}(A\pi D)^2}{8d_{an}} \quad (۱۶)$$

$$V_{ohm,ca} = \frac{i\rho_{ca}(8D)^2}{8d_{ca}}A\left[A+2(1-A-B)\right] \quad (۱۷)$$

$$V_{ohm,el} = i\rho_{eL}d_{eL} \quad (۱۸)$$

$$V_{ohm,in} = i(\pi D)\rho_{in}\frac{d_{in}}{W_{in}} \quad (۱۹)$$

A و B ثابت‌اند و مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰/۸۰۴ و ۰/۱۳ می‌باشد. ρ 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 ۲۲mm و W_{in} عرض متصل‌کنندهٔ داخلی است و مقدار آن برابر ۱۱mm است. مقاومت ویژه تابع دما است و از رابطهٔ تجربی زیر به‌دست می‌آید [۱۴]:

$$\rho = a\exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (۲۰)$$

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

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. به‌علاوه، محصولات واکنش الکتروشیمیایی که در آند ایجاد می شوند، پس

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

از کاهش دادن غلظت ســـوخت در این ناحیه، مقاومت غلظتی را افزایش می‌دهند. عوامل فراوانی در به وجود آمدن گرادیان غلظت مؤثرند از جمله: نفوذ آهستهٔ واکنشگرهای گازی در حفره‌های کاتالیست، انحلال واکنشگرها در الکترولیت، خروج آهستهٔ 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 به‌صورت رابطهٔ زیر بیان می‌شود:

$$V_{con} = \frac{RT}{n_e F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (۲۱)$$

چگالی جریان حدی i_L، جریانی است که در آن، نرخ مصرف سوخت برابر با مقدارآن در زمانی است که بیشترین سرعت تغذیهٔ سوخت برقرار ا ست و این در زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت روی سطح به صفر بر سد، یعنی تمام واکنش‌دهنده‌ها م صرف شود. در اینجا برای مدل سازی V_{con}از مقدار چگالی جریان حدی i_L، برابر $۹۰۰۰ \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{M}^2}$ اسـتفاده شـده اسـت [۴]. نرخ جریان مولی هیدروژن در واکنش الکتروشـیمیایی با چگالی جریان ارتباط مســتقیم دارد. با دانســتن چگالی جریان با اســتفاده از قانون فارادی می‌توان نرخ مولی هیدروژن (z) را از رابطهٔ زیر به‌دست آورد.

$$z = \frac{i.A_{act}.N}{n_e.F} \quad (۲۲)$$

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

$$n_{H_2,in} = \frac{z}{U_f} \quad (۲۳)$$

$$n_{O_2,in} = \frac{z}{2U_a} \quad (۲۴)$$

$$n_{H_2,out} = n_{H_2,in} - z \quad (۲۵)$$

$$n_{H_2O,out} = n_{H_2O,in} + z \quad (۲۶)$$

$$n_{O_2,out} = n_{O_2,in} - \frac{z}{2} \quad (۲۷)$$

$$n_{N_2,out} = n_{N_2,in} \quad (۲۸)$$

U_f و U_a به‌ترتیب فاکتور م‌صرف سوخت و هوا می‌با شد. اکنون پس از محا سبهٔ افت ولتاژهای فوق، ولتاژ کاری پیل با ا ستفاده از معادلهٔ (۱۱) به‌دست می‌آید. توان مستقیم تولید شده توسط پیل سوختی اکسید جامد را می‌توان از رابطهٔ زیر به‌دست‌آورد:

$$\dot{w}_{FC} = V_{cell} I \quad (۲۹)$$

قانون اول ترمودینامیک برای پیل سوختی رامی‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{fuel,Fc} \times U_f \times LHV - \dot{w}_{Fc,dc} - \dot{Q}_{surr} + \dot{m}_{fuel,Fc} \times \left(1 - U_f\right) h_{fuel} - \dot{m}_4 h_4 = 0 \quad (۳۰)$$

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$Q_{surr} = I \cdot \Delta V_{loss} = i \cdot A_{act} \cdot (E - V_{cell}) \quad (۳۱)$$

راندمان اگزرژی و نرخ نابودی اگزرژی در پیل سوختی به‌صورت زیر است:

$$\eta_{exe,FC} = \frac{\dot{w}_{FC.dc}}{\dot{m}_{fuel,FC}(e_f^{ph} + U_f e_f^{ch}) - \dot{m}_4 e_{x4} + \dot{m}_3 e_{x3}} \quad (۳۲)$$

$$\dot{E}_{x,dest,FC} = \dot{m}_3 e_{x3} - \dot{m}_4 e_{x4} - \dot{w}_{FC.dc} + \dot{m}_{fuel,FC}(e_f^{ph} + U_f \times e_f^{ch}) \quad (۳۳)$$

محفظهٔ احتراق

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

$$(\dot{m}_3 + U_f \times \dot{m}_{fuel,Fc})h_4 + \dot{Q}_{comb} - \dot{m}_5 h_5 - \dot{Q}_{loss} = 0 \quad (۳۴)$$

همچنین راندمان اگزرژی و نرخ نابودی اگزرژی در محفظهٔ احتراق به‌صورت زیر است:

$$\dot{E}_{x,dest,comb} = \dot{m}_4 e_{x4} + \dot{m}_{fuel,FC}(1-U_f)e_f^{ch} - \dot{m}_5 e_{x5} + \dot{m}_{fuel.comb}(e_f^{ph} + e_f^{ch}) \quad (۳۶)$$

توربین

توربین، وظیفهٔ 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. رابطهٔ قانون اول برای آن به‌صورت زیر است:

$$\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 + \dot{w}_{GT} = 0 \quad (۳۷)$$

راندمان اگزرژی توربین به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{exe,GT} = \frac{\dot{w}_{GT}}{\dot{m}_5(e_{x5} - e_{x6})} \quad (۳۸)$$

نرخ نابودی اگزرژی نیز در توربین به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{E}_{X,dest,GT} = \dot{m}_5(e_{x5} - e_{x6}) - \dot{w}_{GT} \quad (۳۹)$$

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:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{fuel,Fc} \cdot U_f \cdot LHV_{H_2} + \dot{Q}_{comb} - \dot{m}_8 h_8 - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{surr} - \dot{W}_{Fc,dc} - \dot{w}_{PT} = 0 \quad (۴۳)$$

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

$$\eta_{th}^{cyc} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{Q}_{tot}} \quad (۴۴)$$

$\dot{w}_{net}$ توان خالص تولید شده توسط سیکل است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{w}_{net} = \dot{w}_{T,Gen} + \dot{w}_{Fc,Ac} \quad (۴۵)$$

در رابطهٔ (۴۰)، $\dot{w}_{Fc,Ac}$ و $\dot{w}_{T,Gen}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{w}_{Fc,Ac} = \dot{w}_{Fc,dc} \times \eta_{invert} \quad (۴۶)$$

$$\dot{w}_{T,Gen} = \eta_{Gen} \dot{w}_{T} \quad (۴۷)$$

راندمان اگزرژی کل سیستم نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{exe}^{cyc} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{m}_{fuel}(e_f^{ph} + e_f^{ch})} \quad (۴۸)$$

نرخ نابودی اگزرژی برای یک حجم کنترل از رابطه زیر بدست می آید:

$$\dot{E}_{x,dest} = \sum_i (\dot{E}_{x,in}) - \sum_i (\dot{E}_{x,out}) - \dot{w} + \sum_j \dot{Q}_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \quad (۴۹)$$

با استفاده از رابطه‌ی بالا نرخ نابودی اگزرژی کل سیستم برابر است با:

$$\dot{E}_{x,dest,total} = \dot{m}_1 e_{x1} + \dot{m}_{fuel}(e_f^{ph} + e_f^{ch}) - \dot{m}_8 e_{x8} - \dot{w}_{net} \quad (۵۰)$$

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[۱] (وقتی علائمی وجود دارد که جستجو به سمت مناطق بد فضای جستجو می‌رود) و تشدید جستجو[۲] (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 فضاهای بسیار بزرگ ایجاد می‌کنند که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن جواب بهینه می‌گردد.

[۱] Exploration
[۲] Exploitation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 شناخته‌شد و در سال ۱۹۶۵ توسط جان نلدر و راجر مید برای بهینه سازی توابع هزینه چندبعدی توسعه یافت [۲۲]. لازم به‌ذکر 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 به‌صورت 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 می شود و با ضرایبی که وجود دارد سیمپلکس با انبساط و انقباض مواجه می شود تا این که به جواب بهینه نزدیک شود.بنابراین، استفاده از فرمولاسیون زیر باعث ایجاد یک سیمپلکس منتظم در فضای n بعدی می‌شود:

$$\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_0 + p\mathbf{u}_j + \sum_{\substack{s=1 \\ s\neq j}}^{n} q\mathbf{u}_s \qquad (۵۱)$$

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

$$p = \frac{a}{n\sqrt{2}}\left(\sqrt{n+1}+n-1\right) \qquad (۵۲)$$

$$q = \frac{a}{n\sqrt{2}}\left(\sqrt{n+1}-1\right) \qquad (۵۳)$$

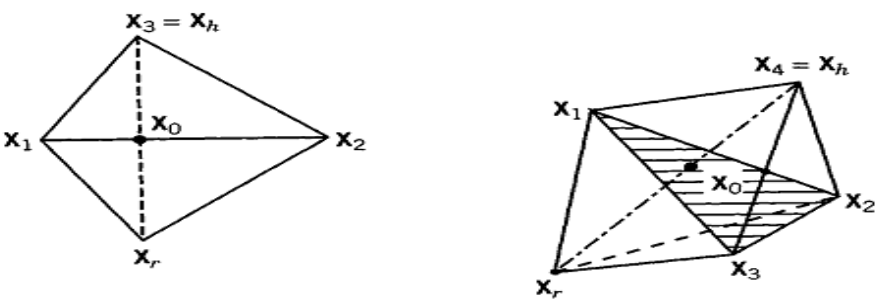
که در روابط بالا a طول ضلع سیمپلکس است. حرکت الگوریتم سیمپلکس برای رسیدن به نقطه بهینه توسط سه عملگر (انعکاس ، انقباض و انبساط) صورت می‌گیرد که معادله حاصله از آن در ادامه تبین شده است:

$$\mathbf{x}_r = (1+\alpha)\,\bar{\mathbf{x}}_0 - \alpha\,\mathbf{x}_h \qquad \alpha > 0 \qquad (۵۴)$$

$$\mathbf{x}_e = \gamma\,\mathbf{x}_r + (1-\gamma)\,\bar{\mathbf{x}}_0 \qquad \gamma > 1 \qquad (۵۵)$$

$$\mathbf{x}_c = \beta\,\mathbf{x}_h + (1-\beta)\,\bar{\mathbf{x}}_0 \qquad 0 \le \beta \le 1 \qquad (۵۶)$$

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]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

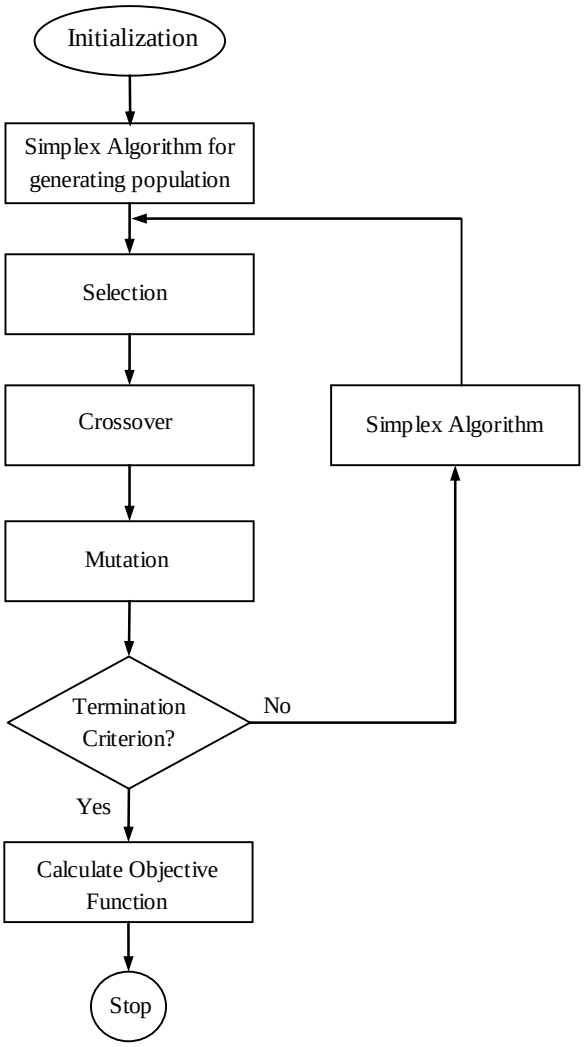
الگوریتم ژنتیک

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 تو سعه یافت [۲۲ و ۲۳]. بر ا ساس نظریه تکاملی داروین آن د سته از صفات طبیعی که با قوانین طبیعی سازگاری بی شتری 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 خصو صیات را نداشته با شند به تدریج و در طی زمان از بین می‌روند. بنابراین می‌توان انتخاب طبیعی را یک رقابت برای حفظ خصو صیات 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 ا ست. تکامل از یک جمعیت اولیه آغاز شده و در ن سل‌های بعدی تکرار می شود. 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. نحوه‌ی 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 ژنیتک 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

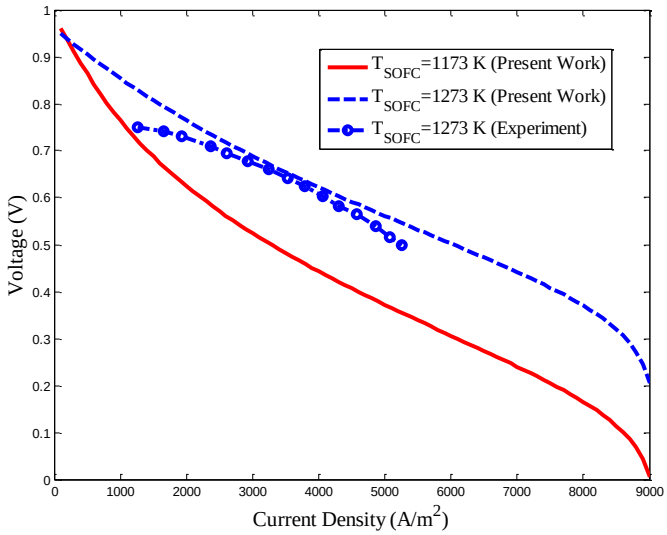


شکل ۳. فلوچارت الگوریتم سیمپلکس- ژنتیک

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 می شود. در داده‌های تجربی نیز روند مشابهی وجود دارد و درستی نتایج را تأیید می‌کند، اما اختلاف ناچیز ایجاد شده ناشی از عوامل مختلفی است. درعمل فرآیند الکتروشیمیایی شامل مکانیزم پیچیده‌ای است. مدل‌سازی هر کدام از افت‌ها خود نیازمند در نظرگرفتن 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 کاتد، همراه بودن نیتروژن و دیگر گازهای موجود در هوا با اکسیژن صرف‌نظر شده‌است، که این باعث ایجاد اندکی اختلاف با مقادیر تجربی شده‌است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

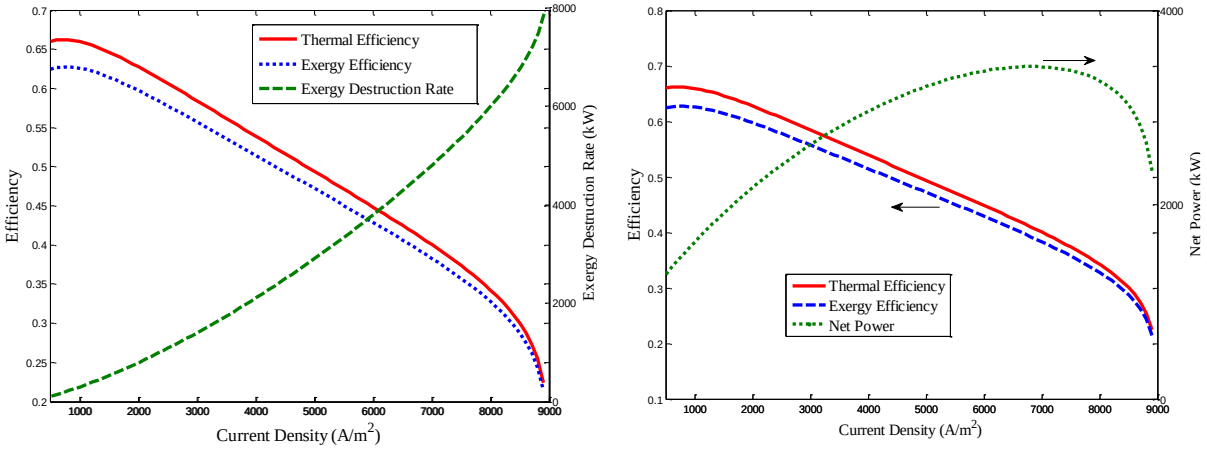


شکل ۴. نمودار ولتاژ پیل سوختی بر حسب چگالی جریان و مقایسه با مقدار تجربی [۱۴] در دمای ۱۲۷۳ کلوین

تحلیل پارامتریک سیکل ترکیبی

شکل (۵– الف) اثر شدت جریان بر توان تولیدی سیستم و راندمان را نشان می‌دهد. هنگامی‌که 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، به‌دلیل 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 اگزرژی سیستم ترکیبی می‌شود، زیرا با افزایش شدت جریان، نرخ سوخت ورودی به پیل سوختی افزایش می‌یابد و به‌دلیل 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 اگزرژی را نشان می‌دهد. در اثر افزایش شدت جریان میزان نرخ نابودی اگزرژی سیستم افزایش می‌یابد. افزایش شدت جریان در واقع به معنای افزایش میزان اگزرژی و افزایش میزان نرخ انتقال حرارت و در نتیجه افزایش میزان نابودی اگزرژی 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 اگزرژی می‌باشد.

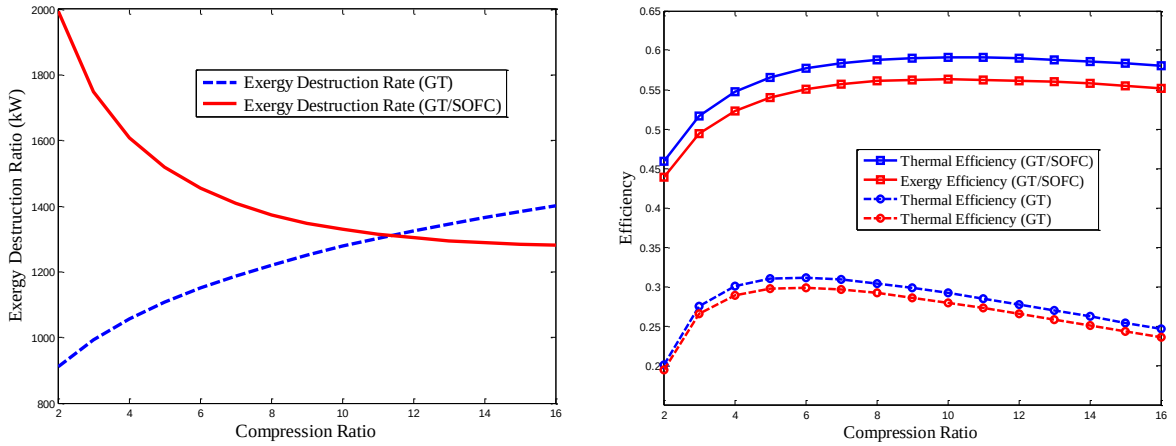
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]



ب) الف)

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

شکل (۶– الف) عملکرد فوق‌العادهٔ سیکل ترکیبی در مقایسه با سیستم معمولی را نشان می‌دهد. 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 پیش‌گرم می‌کند و همچنین باعث تولید انرژی بیشتر می شود. هر دو عامل باعث افزایش انرژی در مقایسه با حالت معمولی می شود. براساس مقادیر پیش‌بینی شده در شکل (۶– الف)، سیکل ترکیبی ۲۷/۴۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به توربین‌گاز 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 اگزرژی را نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود افزایش فشار در سیستم ترکیبی به علت آنکه باعث افزایش توان پیل سوختی می‌شود و چون در سیستم های ترکیبی با پیل سوختی عمده توان را پیل سوختی تامین می‌نماید، میزان نرخ نابودی اگزرژی در سیستم در مقابل سیتم 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.

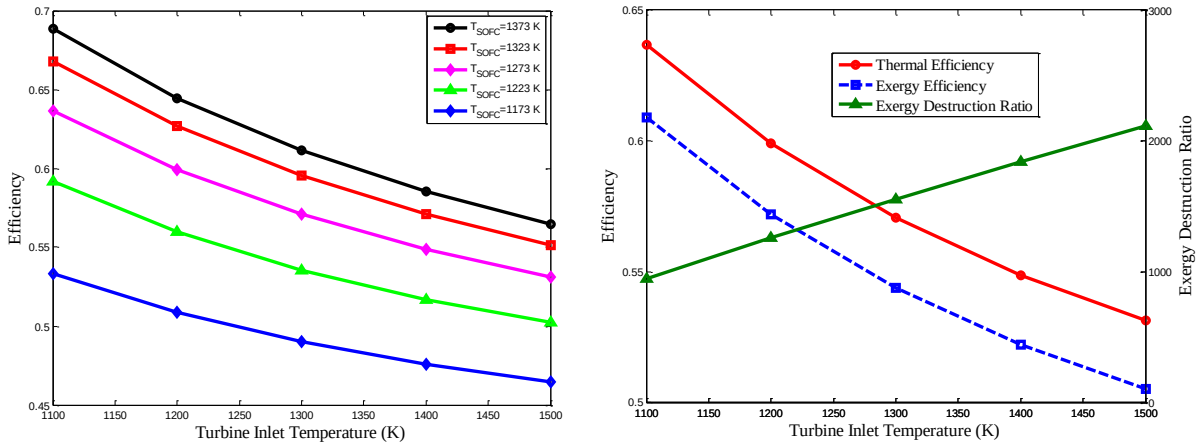


ب) الف)

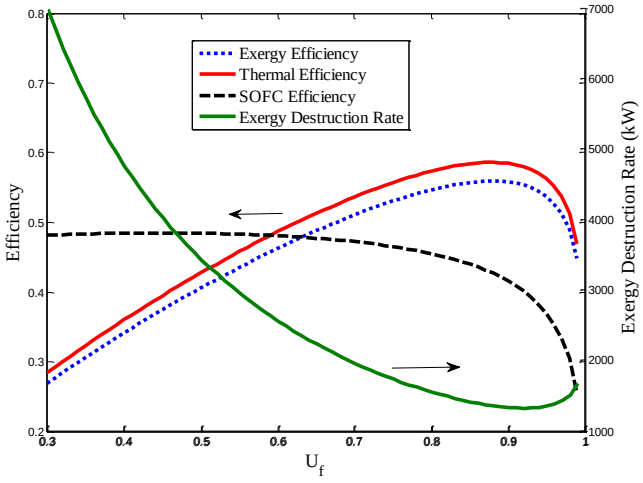
شکل ۶. اثر نسبت فشار الف) بر راندمان حرارتی و اگزرژی سیستم با پیل سوختی و بدون پیل سوختی ب) بر نرخ نابودی اگزرژی در سیتم ترکیبی با پیل‌سوختی و بدون پیل سوختی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

اثر درجه حرارت توربین بر راندمان حرارتی و اگزرژی و نرخ نابودی اگزرژی را در شکل (۷– الف) نشان داده شده است. هنگامی که دمای ورودی توربین افزایش می‌یابد، در راندمان حرارتی و اگزرژی کاهش دیده می شود. این نتیجه جالب توجه است که نشان می‌دهد دمای بیشتر سیال عامل بعد از پیل سوختی در محفظهٔ احتراق مؤثر نیست، اما این دلیل عمده برای استفاده از محفظهٔ احتراق برای سوزاندن جریان سوختی واکنش نداده در پیل سوختی مـی‌باشد. توان ویژهٔ خروجی از سیکل ترکیبی و همچنین کنترل بخشی از این سیستم از دلایل استفاده از محفظهٔ احتراق است. شکل (۷– الف) نشان می‌دهد که افزایش درجه حرارت ورودی به توربین، به‌علت تزریق بیشتر سوخت به محفظه احتراق و در نتیجه بالا بودن هدردهی اگزرژی در طی فرآیند احتراق، باعث افزایش نرخ نابودی اگزرژی سیستم ترکیبی می‌شود. شکل (۷– ب) اثر راندمان حرارتی در اثر افزایش دمای ورود به توربین در دماهای مختلف عملکردی پیل سـوختی را نشـان 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 اگزرژی کل سیستم و راندمان حرارتی و اگزرژی سیستم را می‌توان دید. توان تولیدی سیستم با افزایش اثر فاکتور مصرف سوخت به‌دلیل افزایش افت ولتاژ فعالسازی و کاهش ولتاژ پیل سوخت کاهش می‌یابد، در نتیجهٔ کاهش این ولتاژ، توان سیستم نیز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اثر فاکتور مصـرف سـوخت به دلیل کاهش مصـرف سـوخت، ابتدا باعث افزایش راندمان می‌شـود، 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 اگزرژی و نرخ نابودی اگزرژی سیستم ترکیبی نسبت به به دمای ورود به توربین مختلف، ب) راندمان حرارتی سیستم ترکیبی نسبت به دمای ورود به توربین در دماهای مختلف عملکردی پیل سوختی



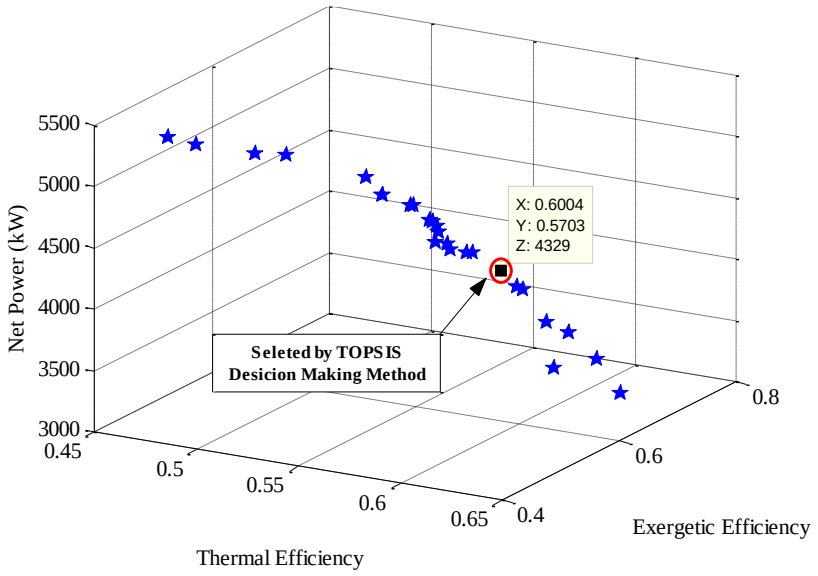
شکل ۸. اثر فاکتور مصرف سوخت بر راندمان پیل سوختی و راندمان حرارتی و اگزرژی و توان تولیدی سیکل ترکیبی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

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 اگزرژی و توان خالص ا ست و متغیرهای طراحی عبارتنداز: نسبت فشار کمپر سور، راندمان آیزنتروپیک کمپر سور، 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 به‌صورت شکل (۹) ارائه شده است. همانطورکه در جبهه پرتو به وضوح می‌توان دید، زمانی که حداقل بازده حرارتی (حدود ۴۵ در صد) ا ست توان خالص سیستم به بیشینه خود (حدود ۵۴۰۰ کیلووات) می‌ر سد. 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.



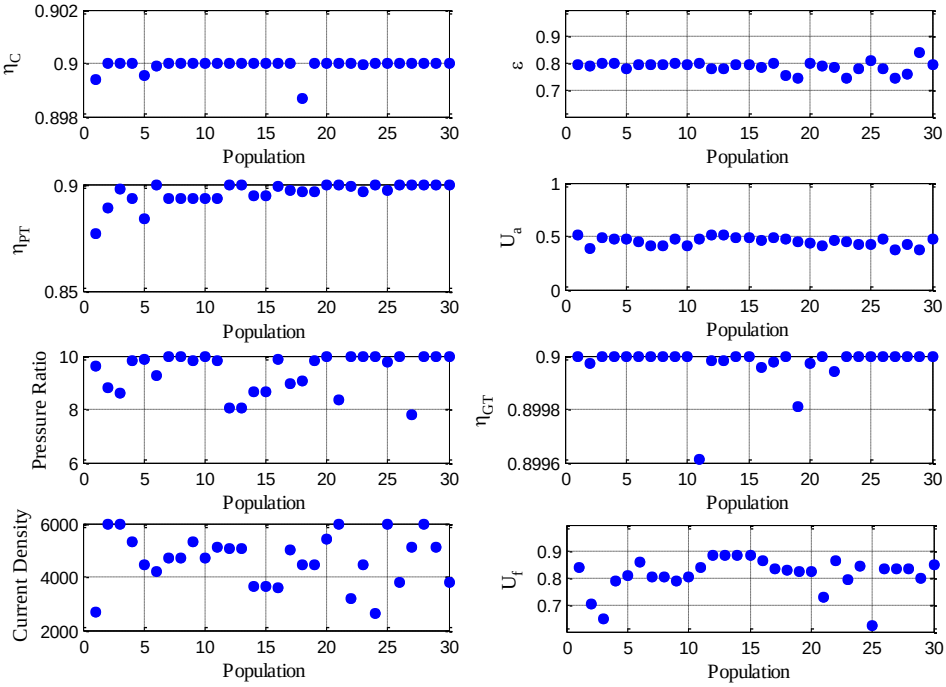
شکل ۹. جبهه بهینه پرتو بدست آمده از روش بهینه ابتکاری برای سیکل ترکیبی

جدول ۱ نتایج حا صل از بهینه سازی چند هدف بر ا ساس انتخاب منا سب‌ترین 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 اگزرژی 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 محفظهٔ احتراق رخ می‌دهد؛ جایی که بیشترین میزان سوخت در آنجا واکنش می‌دهد. البته باید توجه داشت که در حالت بهینه درصد نابودی اگزرژی در پیل سوختی بیشتر از حالت پایه ا ست.زیرا در حالت بهینه نسبت فشار کمپر سور بیشتر از حالت پایه ا ست و در نتیجه دمای خروجی از کمپرسور افزایش، در نتیجهٔ میزان سوخت تزریقی به محفظه کاهش می‌یابد.

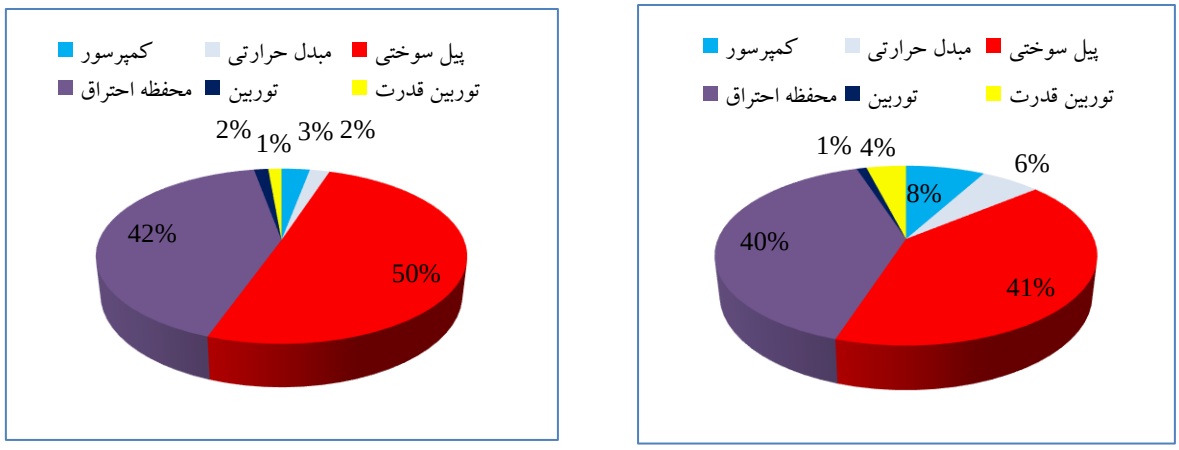
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

جدول ۱. مقایسه متغیرهای طراحی در حالت پایه و بهینه

متغیرهای طراحی	η_c	ε	η_{PT}	R_p	U_a	I	U_f	η_{GT}
حالت پایه	۰/۸۱	۰/۸	۰/۸۹	۴	۰/۲۵	۳۰۰۰	۰/۸۵	۰/۸۴
حالت بهینه	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۹/۲۵	۰/۴۵	۴۲۰۰	۰/۸۶	۰/۹



شکل ۱۰. توزیع مقادیر بهینه پارامترهای طراحی



(ب) (الف)

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

۶.نتیجه‌گیری

در این مقاله با بکارگیری یک الگوریتم بهینه پی شنهادی برپایه الگوریتم سیمپلکس و ژنتیک، بهینه سازی سیکل توربین‌گاز مجهز به پیل سوختی اک سیدجامد انجام شده‌ا ست. در ابتدا به‌منظور یافتن پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سی ستم یک آنالیز پارامتریک صورت گرفت. سه تابع هدف راندمان حرارتی و اگزرژی و توان خالص به‌منظور بهینه سازی سیکل ترکیبی انتخاب شد و نمودار جبهه پرتو برای آن تر سیم گردید. برای انتخاب نقطه بهتر در نمودار جبهه پرتو از روش TOPSIS اسـتفاده شـد. نتیجه این انتخاب نشـان داد که مناسـب‌ترین نقطه در جبهه پرتو دارای راندمان حرارتی۶۰٪ ، در حالیکه توان خالص به‌میزان ۷۶٪ نسبت به‌حالت پایه افزایش داشته‌است.

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. ۱۳٦, pp. ۱–۹. doi: ۱۰,۱۱٤۰/epjp/s۱۳۳٦۰-۰۲۱-۰۱۰۷۱-۱.

[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. ۱۳٦, no. ۱۰, p. ۱۰۱۹, Oct. ۲۰۲۱. doi: ۱۰,۱۱٤۰/epjp/s۱۳۳٦۰-۰۲۱-۰۱۹۹۹-٤.

[۳] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha. (۲۰۲۵), "Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Peugeot ۲۰٦ Radiator Using Oxide Nanofluids," *Sci. Technol. Mech. Eng*. Article ID: e۲۲۱٦۲٤. doi: ۱۰,۲۲۰۳٤/stme.۲۰۲۵,٥۱٥۱٤۷,۱۱۱۷.

[٤] 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. ۱٥, no. ٥۱, pp. ۳۱۹–۳۳۰. doi: ۱۰,۲۲۰۷٥/jme.۲۰۱۷,۲۸٤۸.

[٥] H. Pourmirzaagha, V. Esfahanian, F. Sabetghadam, and F. Torabi. (۲۰۱٦), "Single and multi-objective optimization for the performance enhancement of lead–acid battery cell," *Int. J. Energy Res.*, vol. ٤۰, no. ۱٤, pp. ۱۹٦٦–۱۹۷۸. doi: ۱۰,۱۰۰۲/er.۳٥۷٤.

[٦] 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. ۲۷–۳٥. doi: ۱۰,۱۱۱٥/۱,٤۸۳۱۸۷.

[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. ۹٦, no. ۲, pp. ۳٥۲–۳٦۸. doi: ۱۰,۱۰۱٦/S۰۳۷۸-۷۷٥۳(۰۰)۰۰٦٦۸-٦.

[۸] W. J. Yang et al. (۲۰۰٦), "Design performance analysis of pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems considering temperature constraints," *J. Power Sources*, vol. ۱٦۰, no. ۱, pp. ٤٦۲–٤۷۳. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.jpowsour.۲۰۰٦,۰۱,۰۱۸.

[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: ۱۰,۱۰۱٦/j.jpowsour.۲۰۰۷,۰۳,۰٦۷.

[۱۰] I. Dincer and M. A. Rosen. (۲۰۰٤), "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. ۸۷–۹٦.

[۱۲] F. Calise, A. Palombo, and L. Vanoli. (۲۰۰٦), "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC–GT power plant," *J. Power Sources*, vol. ۱٥۸, no. ۱, pp. ۲۲٥–۲٤٤. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.jpowsour.۲۰۰٥,۰۷,۰۸۸.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

[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: ۱۰,۱۱۱۵/۱,۲۸۹٤٤٦۹.

[۱٤] 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. ۳٤, no. ٥, pp. ۲۳۹٦–۲٤۰۷. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ijhydene.۲۰۰۸,۱۲,۰٦٥.

[۱٥] H. Noorbakhsh, M. H. Manesh, and M. Amidpour, (۲۰۲٤). "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. ۱۳۳٤۸۸. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۲٤,۱۳۳٤۸۸.

[۱٦] S. Li et al. (۲۰۲٥), "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. ۱۰٥, p. ۱۱٤٦۸۱. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.est.۲۰۲٤,۱۱٤٦۸۱.

[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. ٥٥, pp. ۱٤۲–۱٥٥.

[۱۸] S. Hosseini, J. Pirkandi, and Z. P. Moziraji. (۲۰۲٥), "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. ٥۹–۷٤. doi: ۱۰,۲۲۱۰٤/hfe.۲۰۲٤,۷۰۲۱,۱۳۰۸.

[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. ٥۸۱۱–٥۸۲۲. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.ijhydene.۲۰۰۸,۰٥,۰۳٦.

[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. ٤۸۰, no. ۱–۲, pp. ۱–۹. doi: ۱۰,۱۰۱٦/j.tca.۲۰۰۸,۰۹,۰۰۷.

[۲۱] H. I. Saravanamuttoo, G. F. Rogers, and H. Cohen. (۲۰۰۱), Gas Turbine Theory, Pearson Education.

[۲۲] Rao, S. (۱۹۹٦). "Engineering optimization theory and practice", ۳rd Edition, A Wiley-Inerscience Publication.

[۲۳] Chelouah, R., Siarry, P. (۲۰۰۳). "Genetic and Nelder-Mead algorithm hybridized for a more accurate global optimization of continuous multiminima functions". European J of Operational Research.

[۲٤] 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. ۲۸۹–٤۸٦.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۱، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۱-۲۰

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

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 ۷٦٪ with respect to basic module.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-22]