

بهینه‌سازی، تحلیل ترمودینامیکی و انتگرالسیون سیستم هیبریدی مشتمل بر پیل سوختی کربنات مذاب و موتور استرلینگ

میرحسین آقاخواه رازلبلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده فنی - مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

محمدعلی رضانی (دانشجوی دکتری)
دانشکده فنی - مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

محمد افتخاریزیدی* (استادیار)

آرمن آدامیان (استادیار)

دانشکده فنی - مهندسی، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۸ (۱۱-۳)
دوری ۳-۳، شماره ۱، ص. ۱۱-۳

سیستم هیبریدی مشتمل بر پیل سوختی کربنات مذاب و موتور استرلینگ که اخیراً به آن بهای بیشتری داده شده است و به نوعی می‌توان از آن به عنوان انرژی پاک و نو یاد کرد. در این مقاله به بهینه‌سازی فشارهای جزئی آند و کاتد، دما و چگالی جریان پیل سوختی پرداخته شده است که برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب استفاده شده است که بیشترین درصد بازده برای سیستم هیبریدی ۸۴/۷۱٪ است. در ادامه ابتدا به بررسی کار و بازده برگشت‌ناپذیر و سپس کار و بازده برگشت‌پذیر سیستم هیبریدی و هر یک از اجزای آن می‌پردازیم. سپس به بررسی ولتاژ پیل سوختی کربنات مذاب در حالت برگشت‌ناپذیر و برگشت‌پذیر می‌پردازیم. بازده سیستم هیبریدی در حالت برگشت‌ناپذیر خود ۷۸/۶۰٪ و در حالت برگشت‌پذیر با بیشینه کار برگشت‌پذیر پیل سوختی کربنات مذاب ۹۴/۲۱٪ است. قسمت پایانی این مقاله که از نوآوری‌های آن نیز است، انتگرالسیون بازده سیستم هیبریدی است.

mhaghakhah@yahoo.com
ramezani.suna@gmail.com
eftekhariyazdi@yahoo.com
dr_adamian@yahoo.com

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، تحلیل ترمودینامیکی، انتگرالسیون، پیل سوختی کربنات مذاب، موتور استرلینگ.

۱. مقدمه

با توجه به افزایش قیمت سوخت و نگرانی‌های زیست‌محیطی پیل‌های سوختی به عنوان یک جایگزین برای نیروگاه‌های سنتی در نظر گرفته می‌شود.^[۱-۳] در میان پیل‌های سوختی موجود تولید شده^[۴-۶] پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) به عنوان یک پیل سوختی با کارکرد دما بالا و کاربرد نیروگاهی که از آن حرارت بالا خارج می‌شود مورد توجه قرار می‌گیرد.^[۷-۹] موتور استرلینگ نیز به عنوان یک موتور رفت و برگشتی با راندمان بالا که به دلیل بی سروصدا بودن کارکرد موتور و هم از لحاظ اقتصادی مورد توجه است. طرز کار سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی کربنات مذاب و موتور استرلینگ بدین صورت است که در آند پیل سوختی کربنات مذاب هیدروژن با یون کربنات واکنش داده و الکترون و آب و دی‌اکسید کربن تولید می‌کند که دی‌اکسید کربن طی یک چرخه به کاتد منتقل می‌شود و در آن‌جا با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۶/۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۲۶.

DOI:10.24200/J40.2018.10750.1408

برگشت پذیر سیستم هیبریدی شامل پیل سوختی کربنات مذاب و موتور استرلینگ بررسی می‌شود. ولتاژ برگشت‌ناپذیر و برگشت پذیر پیل سوختی کربنات مذاب نیز بررسی خواهد شد.

در این نوشتار ضمن بررسی سیستم هیبریدی، صعودی بودن شکل بازده بر حسب دما برای پیل سوختی کربنات مذاب بین دما $800 K \leq T \leq 1100 K$ و نزولی بودن شکل بازده بر حسب دمای موتور استرلینگ در همان بازه زمانی و نیز حالت انتگرالی و یکنواختی خاص شکل بازده بر حسب دمای سیستم هیبریدی در بازه دمایی گفته شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مسئله‌ی اصلی در این مقاله، بهینه‌سازی بازده پیل سوختی کربنات مذاب است که این کار با الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب در به دست آوردن مقداری از فشارهای جزئی آند و کاتد، که بازده پیل سوختی را افزایش دهند. چون بازده موتور استرلینگ نیز وابسته به بازده پیل سوختی است در این صورت بازده موتور استرلینگ نیز افزایش داشته و در کل بازده سیستم هیبریدی افزایش می‌یابد.

۲. الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک (GA) تکنیک جست‌وجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جست‌وجو است. الگوریتم ژنتیک نوع خاصی از الگوریتم‌های تکامل است که از تکنیک‌های زیست‌شناسی مانند وراثت و جهش استفاده می‌کند.

الگوریتم‌های ژنتیک معمولاً به‌عنوان یک شبیه‌ساز رایانه‌ی که در آن جمعیت یک نمونه‌ی انتزاعی (کروموزوم‌ها) از نامزد‌های راه‌حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به راه حل بهتری منجر شود پیاده‌سازی می‌شوند. به طور سنتی راه‌حل‌ها به شکل رشته‌هایی از صفر و ۱ بودند، اما امروزه به گونه‌های دیگری هم پیاده‌سازی شده‌اند. فرضیه با جمعیتی کاملاً تصادفی منحصر به فرد آغاز می‌شود و در نسل‌ها ادامه می‌یابد. در هر نسل گنجایش تمام جمعیت ارزیابی می‌شود، چندین فرد منحصر در فرایندی تصادفی از نسل جاری انتخاب (بر اساس شایستگی‌ها) و برای شکل دادن نسل جدید اصلاح می‌شود (کسر یا دوباره ترکیب می‌شود) و در تکرار بعدی الگوریتم به نسل جاری تبدیل می‌شود.

موتور الگوریتم ژنتیک، جمعیت اولیه‌ی از فرمول ایجاد می‌کند. هر فرد در برابر مجموعه‌ی از داده‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرد و مناسب‌ترین آنها (شاید ۱۰ درصد از مناسب‌ترین‌ها) باقی می‌ماند و بقیه کنار گذاشته می‌شود. مناسب‌ترین افراد با هم جفت‌گیری (جابه‌جایی عناصر دی‌ان‌ای) و تغییر (تغییر تصادفی عناصر دی‌ان‌ای) کرده‌اند. مشاهده می‌شود که با گذشت از میان تعداد زیادی از نسل‌ها، الگوریتم ژنتیک به سمت ایجاد فرمول‌هایی دقیق‌تر میل می‌کند. در حالی که شبکه‌های عصبی هم غیرخطی و غیر پارامتریک‌اند، جذابیت زیاد الگوریتم‌های ژنتیک چشمگیری نتایج نهایی است. فرمول نهایی برای کار بر انسانی قابل مشاهده خواهد بود و برای ارائه‌ی سطح اطمینان نتایج می‌توان تکنیک‌های آماری متعارف را بر این فرمول‌ها اعمال کرد. فتاوری الگوریتم‌های ژنتیک همواره در حال بهبود است؛ همانند طرح معادله‌ی ویروس‌ها که در کنار فرمول‌ها و برای نقض فرمول‌های ضعیف تولید می‌شوند و در نتیجه جمعیت را کلاً قوی‌تر می‌سازند.

به اختصار چنین گفته می‌شود که الگوریتم ژنتیک یا (GA) یک تکنیک برنامه‌نویسی است که از تکامل ژنتیکی به‌عنوان یک الگوی حل مسئله‌ی استفاده

می‌کند. مسئله‌ی که باید حل شود ورودی است و راه حل‌ها طبق یک الگو کدگذاری می‌شوند که تابع fitness نام دارد و هر راه حل کاندید را ارزیابی می‌کند که اکثر آنها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

۳. قوانین ترمودینامیکی

قانون اول ترمودینامیک که به اصل بقای انرژی نیز معروف است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q - W = \Delta E \quad (1)$$

انرژی نه خلق می‌شود و نه نابود، بلکه فقط از شکلی به شکل دیگر تغییر می‌کند: از نظر قانون اول بین گرما و کار تفاوتی وجود ندارد اما خواهیم دید که از نظر قانون دوم، گرما با کار تفاوت‌های زیادی با هم دارند، ضمن این‌که برقراری قانون اول به معنای انجام‌پذیر بودن فرایند نیست.

۱.۳. قانون دوم ترمودینامیک از بیان کلونین - پلانک به صورت زیر

است:

غیرممکن است که سیستمی به صورت چرخه‌ی عمل کند، به طوری که گرما را تنها از یک منبع گرمایی گرفته و به همان مقدار نیز کار تولید نماید. در ماشین‌های گرمایی، داشتن راندمان ۱۰۰ درصد غیرممکن است.

۲.۳. قانون دوم ترمودینامیک از بیان کلار یوس:

غیرممکن است که سیستمی به صورت چرخه‌ی عمل کند، به طوری که تنها نتیجه‌ی عملکرد آن انتقال گرما از یک جسم سرد به یک جسم گرم باشد. هیچ یخچالی نمی‌تواند بدون کار اولیه، عمل کند.

۳.۳. قانون دوم از دیدگاه آنتروپی

هر فرایند طبیعی در جهتی پیش می‌رود که آنتروپی کل افزایش یابد. $\Delta S > 0$ قانون سوم ترمودینامیک مقدار عددی آنتروپی را مشخص می‌کند.

اگر انتگرال یک کمیت روی یک چرخه‌ی دلخواه، برابر صفر باشد این کمیت خود یک «خاصیت ترمودینامیک» است. نتیجه می‌گیریم که $\frac{\delta Q}{T}$ نشان دهنده‌ی تغییر دیفرانسیلی یک خاصیت ترمودینامیکی است، این خاصیت را «آنتروپی» می‌نامند.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (2)$$

و برای یک سیستم برگشت پذیر خواهیم داشت:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (3)$$

آنتروپی را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (4)$$

علامت تساوی برای فرایند برگشت پذیر و علامت نامساوی برای فرایند برگشت‌ناپذیر است. تولید آنتروپی با توجه به رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$\Delta S_{sys} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen} \quad (5)$$

$$E_s = -\frac{\Delta G}{n_e F} \quad (13)$$

برای محاسبه‌ی بازده موتور استرلینگ از رابطه‌ی ۱۴-۱۷ استفاده می‌کنیم:

$$\eta_{engine} = \frac{\alpha_1(1-\eta_{cell})j - (T-T_0)(\alpha_r + \alpha_r)(\alpha-1)T - \alpha T_0 + T_e}{2\alpha T + \alpha[\alpha_1(1-\eta_{cell})j - (T-T_0)(\alpha_r + \alpha_r) + (\alpha-1)T - \alpha T_0 + T_e]} \quad (14)$$

$$T_e = \left\{ \left[(a+1)T + \alpha T, \frac{q_h}{K} \right]^2 - 4a(a+1)TT_0 \right\}^{0.5} \quad (15)$$

$$K = \frac{k_1}{[(1+b)(1 + \sqrt{\frac{k_1}{k_r}})^2]} \quad (16)$$

$$q_h = -\frac{\Delta h}{n_e F} j A - U_{cell} j A - \alpha A_1(T - T_0) - K r_e(1 - \varepsilon)(T - T_0) \quad (17)$$

K ضریب رسانش، α ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و ε نسبت بین ۱ و صفر است. برای محاسبه‌ی توان موتور استرلینگ از رابطه‌ی ۱۸ استفاده می‌کنیم:

$$P_{engine} = -\frac{A\Delta h}{\alpha_1 n_e F} [a_1(1 - \eta_{cell})j - (T - T_0)(\alpha_r + \alpha_r)] \eta_{engine} \quad (18)$$

بازده سیستم هیبریدی بر اساس رابطه‌ی ۱۹ و ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$\eta_{hybrid} = \frac{P_{hybrid}}{Q_{all}^{\bullet}} = \frac{P_{cell} + P_{engine}}{-\Delta H^{\bullet}} \quad (19)$$

$$\eta_{hybrid} = \eta_{cell} + \eta_{engine} \left[1 - \eta_{cell} - (T - T_0) \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_1 j} + \frac{\alpha_r}{\alpha_1 j} \right) \right] \quad (20)$$

توان سیستم هیبریدی بر اساس رابطه‌ی ۲۱ محاسبه می‌شود:

$$P_{hybrid} = \eta_{hybrid} (-\Delta H^{\bullet}) \quad (21)$$

بیشترین کار و بازده برگشت‌پذیر پیل سوختی کربنات مذاب در دمای محیط ایجاد می‌شود. ابتدا تغییرات آنتالپی واکنش در دمای محیط و سپس تغییرات آنتروپی واکنش را محاسبه کرده و در رابطه‌ی تغییرات انرژی گیبس قرار می‌دهیم؛ منفی انرژی گیبس برابر کار پیل سوختی کربنات مذاب است. اما در محاسبه‌ی بازده برگشت‌پذیر باید به این نکته توجه کرد که اگر تغییرات آنتروپی مثبت شد باید از رابطه ۲۴ استفاده کرد.^[۱۸]

$$W = -(\Delta_f H(T_c) - T_c \Delta_f S(T_c)) = \Delta_f G(T_c) \quad (22)$$

$$\eta_{FC}(T_c) = \frac{W_{FC}(T_c)}{-\Delta_f H(T_c)} = \frac{-\Delta_f G(T_c)}{-\Delta_f H(T_c)} \quad (23)$$

$$Q_{in} = \begin{cases} \Delta H_R \rightarrow if \Delta S_R \leq 0 \\ \Delta H_R + T \Delta S_R \rightarrow if \Delta S_R > 0 \end{cases} \quad (24)$$

برای کار و بازده برگشت‌پذیر پیل سوختی کربنات مذاب در دمای عملیاتی باید از روابط ۲۵ و ۲۶ استفاده شود.

$$W_{FC}(T_c) = -(\Delta_f H(T_c) - T_c \Delta_f S(T_c)) = \Delta_f G(T_c) \quad (25)$$

$$\eta_{FC}(T_c) = \frac{W_{FC}(T_c)}{-\Delta_f H(T_c)} = \frac{-\Delta_f G(T_c)}{-\Delta_f H(T_c)} \quad (26)$$

به این ترتیب می‌توان در مورد تولید آنتروپی چنین نتیجه گرفت:

$\Delta S > 0$ فرایند برگشت‌ناپذیر است

$\Delta S = 0$ فرایند برگشت‌پذیر است

$\Delta S < 0$ فرایند غیرممکن است

۴.۳. فرایندهای برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر

فرایند برگشت‌پذیر فرایندی است که وقتی از یک حالت تعادل اولیه آغاز می‌شود در هر لحظه در طول فرایند، هم سیستم و هم محیط در حال برهم‌کنش با آن، بتوانند به حالات اولیه‌شان بازگردند. به عبارت دیگر، فرایند برگشت‌پذیر فرایندی است که بدون بر جای گذاشتن هرگونه اثری بر محیط، می‌تواند معکوس شود. در فرایندهای برگشت‌پذیر تمامی تبدلات گرما و کاری که طی مسیر مستقیم رخ می‌دهد، طی فرایند معکوس، از نظر اندازه برابر و بدون تغییر می‌ماند اما از نظر جهت، برعکس می‌شوند. تمامی فرایندهای خود به خودی، برگشت‌ناپذیرند.

از مقایسه‌ی بازده گرمایی ماشین‌های واقعی و برگشت‌پذیر که بین دو دمای یکسان عمل می‌کنند، خواهیم داشت:

ماشین گرمایی غیرممکن

ماشین گرمایی برگشت‌پذیر

ماشین گرمایی برگشت‌ناپذیر

۴. روابط

برای محاسبه‌ی توان پیل سوختی از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌کنیم.^[۱۱]

$$P_{cell} = \left\{ E_s + \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{H_2,an}(P_{O_2,cat})^{1/2} P_{CO_2,cat}}{P_{H_2,O,an} P_{CO_2,an}} \right) - (R_{an} - R_{cat} - R_{ohm}) \right\} j A \quad (6)$$

$$R_{an} = 2.27 \times 10^{-9} j \exp \left(\frac{E_{act,an}}{RT} \right) P_{H_2}^{-0.22} P_{CO_2}^{-0.17} P_{H_2O}^{-1} \quad (7)$$

$$R_{cat} = 7.5 \times 10^{-10} j \exp \left(\frac{E_{act,cat}}{RT} \right) P_{O_2}^{-0.22} P_{CO_2}^{-0.9} \quad (8)$$

$$R_{ohm} = 0.75 \times 10^{-2} j \exp \left[3.016 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923} \right) \right] \quad (9)$$

که در آن J چگالی جریان و A مساحت صفحات آند و کاتد است. بقیه‌ی علائم در جدول ۱ آمده است.

برای محاسبه‌ی بازده پیل سوختی از رابطه‌ی ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌کنیم؛

رابطه‌ی ۱۰ نرخ آنتالپی را نشان می‌دهد. $h\Delta$ تغییرات آنتالپی واکنش است. P توان و η بازده است.

$$\Delta H^{\bullet} = -\frac{\Delta h}{n_e F} j A \quad (10)$$

$$\eta_{cell} = \frac{P_{cell}}{-\Delta H^{\bullet}} \quad (11)$$

انرژی آزاد گیبس را از رابطه‌ی ۱۲، و سپس پتانسیل استاندارد را از رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌کنیم.^[۱۷]

$$\Delta G = -242000 + 45.8T \quad (12)$$

۱. بهینه‌سازی فشارهای جزئی آند
 ۲. بهینه‌سازی فشارهای جزئی کاتد
 ۳. بیشترین بازده بر اساس دما و چگالی جریان
 ۴. بیشترین چگالی فشار بر حسب دما
- این تنظیم‌ها برای هر چهار قسمت عبارت است از:

بازده برگشت پذیر موتور استرلینگ نیز همان بازده کارنو است که از رابطه‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود.

$$\eta_{engine} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_c}{T} \quad (27)$$

و در نهایت بازده برگشت پذیر سیستم هیبریدی از رابطه ۲۸ به دست می‌آید:

$$\eta_{hybrid} = \eta_{cell} + (1 - \frac{T_c}{T})(1 - \eta_{cell}) \quad (28)$$

ولتاژ برگشت ناپذیر پیل سوختی کربنات مذاب بر اساس رابطه‌ی ۲۹ محاسبه می‌شود؛ رابطه‌ی ۳۰ ولتاژ نرنست - ولتاژ برگشت پذیر - است یعنی اگر در رابطه‌ی ۲۹ اضافه ولتاژها را حذف کنیم رابطه‌ی ۳۰ به دست می‌آید که ولتاژ برگشت پذیر است. چنان که گفته شد بیشینه ولتاژ در دمای محیط صورت می‌گیرد.

$$V = E_{Nernst} - j(R_{an} + R_{cat} + R_{ohm}) \quad (29)$$

$$E_{Nernst} = \frac{-\Delta G}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2,an}(P_{O_2,cat})^{\frac{1}{2}} P_{CO_2,cat}}{P_{H_2O,an} P_{CO_2,an}}\right) \quad (30)$$

برای محاسبات خود از جدول ۱ استفاده می‌کنیم.^[۱۲]
برای استفاده از الگوریتم ژنتیک برنامه‌ی MATLAB و تنظیم‌های این نرم‌افزار در هر بخش به صورت زیر عمل می‌کنیم.

در GA tool در قسمت‌های مشخص شده تنظیم‌های زیر را انجام می‌دهیم که این تنظیم‌ها برای چهار قسمت بهینه‌سازی که با برنامه MATLAB انجام می‌دهیم یکسان است. این چهار قسمت عبارت‌اند از:

جدول ۱. مقادیر پارامترهای استفاده شده در روابط.

۱(atm)	فشار عملیاتی P_o
۸۹۳/۱۵(K)	دمای عملیاتی T
۲۹۳/۱۵(K)	دمای محیط T_c
"۱" - "۸" $[J^{-1} mol^{-1}]$	انرژی فعال سازی آند $E_{act,an}$
"۱" - "۸" $[J^{-1} mol^{-1}]$	انرژی فعال سازی کاتد $E_{act,ca}$
۰/۶(atm)	فشار جزئی هیدروژن در آند $P_{H_2,an}$
۰/۱۵(atm)	فشار جزئی دی اکسید کربن در آند $P_{CO_2,an}$
۰/۲۵(atm)	فشار جزئی آب در آند $P_{H_2O,an}$
۰/۰۸(atm)	فشار جزئی اکسیژن در کاتد $P_{O_2,ca}$
۰/۵۹(atm)	فشار جزئی نیتروژن در کاتد $P_{N_2,ca}$
۰/۰۸(atm)	فشار جزئی دی اکسید کربن در کاتد $P_{CO_2,ca}$
۰/۲۵(atm)	فشار جزئی آب در کاتد $P_{H_2O,ca}$
۹۶۴۸۵(Cmol ⁻¹)	ثابت فارادی F
۲(Jmol ⁻¹ V ⁻¹)	تعداد الکترون n_e
۸۳۱۴(Jmol ⁻¹ K ⁻¹)	ثابت جهانی گاز R
۰/۰۱	پارامتر a
۰/۱۰۳	پارامتر a_1

Reproduction

Elite count → Specify = ۰

Stopping criteria

Generations → Specify = ۱۰۰۰۰۰۰

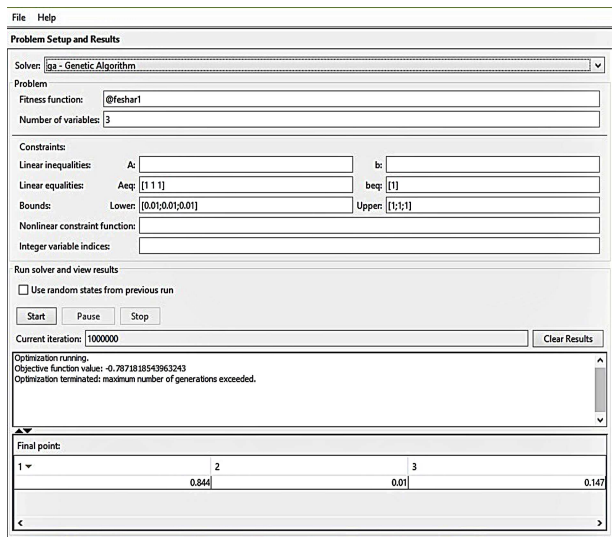
Stall generations → Specify = inf

Function tolerance → Specify = ۱e - ۸

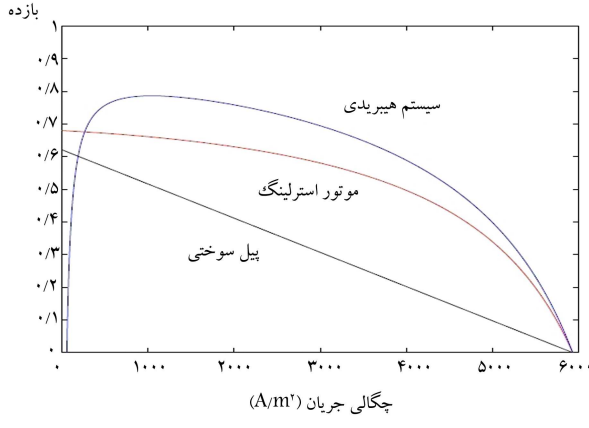
Population

Initial range → Specify = [-۵; ۵]

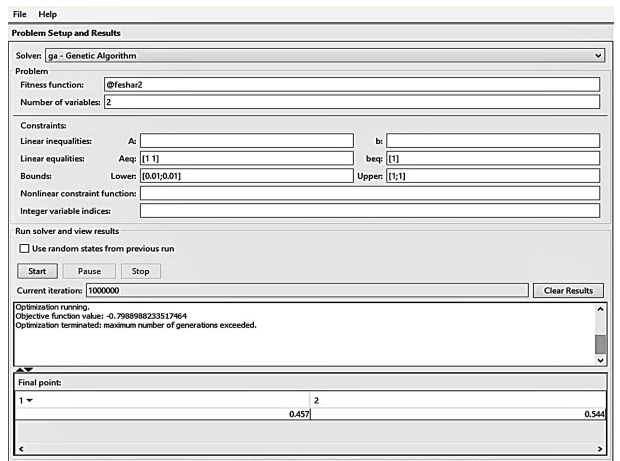
قسمت Population برای بهینه‌سازی‌های قسمت ۱ و ۲ است. قسمت‌های سه و چهار در حالت default است. چون حالت نخبه بودن را صفر در نظر گرفتیم روش الگوریتم ما روش الگوریتم ژنتیک زایشی (GGA) نام می‌گیرد. در GGA کل جمعیت هر نسل با فرزندان آن نسل جایگزین می‌شود. عموماً انتظار می‌رود که فرزندان بلوک‌های مهم را از بهترین رشته‌های جمعیت به نسل بعد منتقل کنند. در واقع در این روش بهترین رشته‌های جمعیت حاضر به نسل بعد منتقل نمی‌شوند. چون تعداد نسل‌ها را یک میلیون در نظر گرفتیم تا جواب‌های دقیق‌تری به دست آیند، هر اجرا نزدیک به ۱ الی ۲ ساعت زمان می‌برد. اما تنظیم‌ها برای بهینه‌سازی در قسمت ۱ گفته شد و در شکل ۱ نیز آورده شده است. بهینه‌سازی شماره ۲ که گفته شده مربوط به فشارهای جزئی کاتد است، در تنظیم‌ها مطابق شکل ۲ است: و تنظیم بهینه‌سازی شماره ۳ مطابق شکل ۳ است، و تنظیم بهینه‌سازی چهارم مطابق شکل ۴ است:



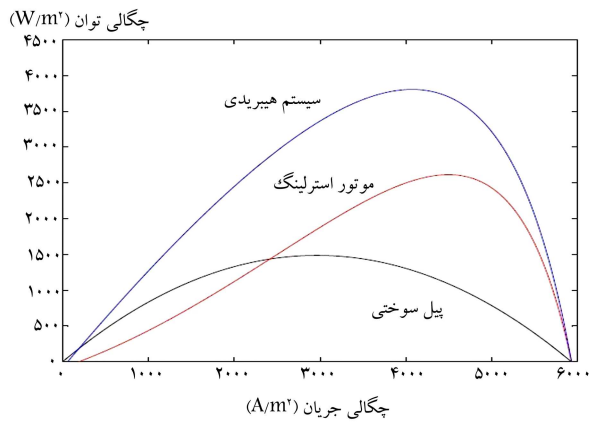
شکل ۱. بهینه‌سازی فشارهای جزئی آند.



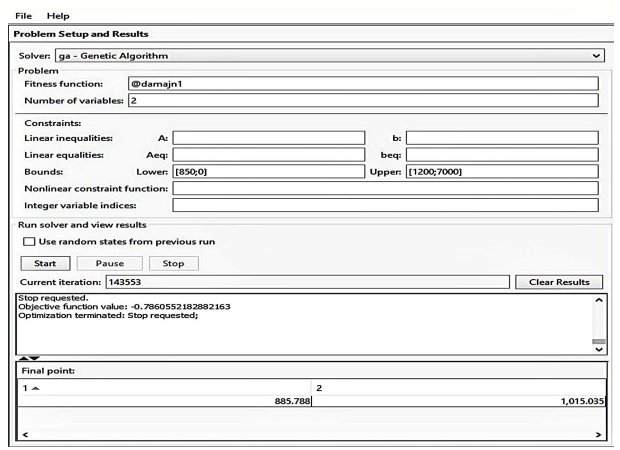
شکل ۵. بازده به چگالی جریان سیستم هیبریدی و اجزای آن.



شکل ۲. بهینه‌سازی فشارهای جزئی کاند.



شکل ۶. چگالی توان به چگالی جریان سیستم هیبریدی و اجزای آن.



شکل ۳. بیشترین بازده بر اساس دما و چگالی جریان.

جدول ۲. فشارهای جزئی مولکول‌های آند به دست آمده از الگوریتم ژنتیک.

H_2,an	CO_2,an	H_2O,an
۰٫۸۴۴	۰٫۰۱	۰٫۱۴۷

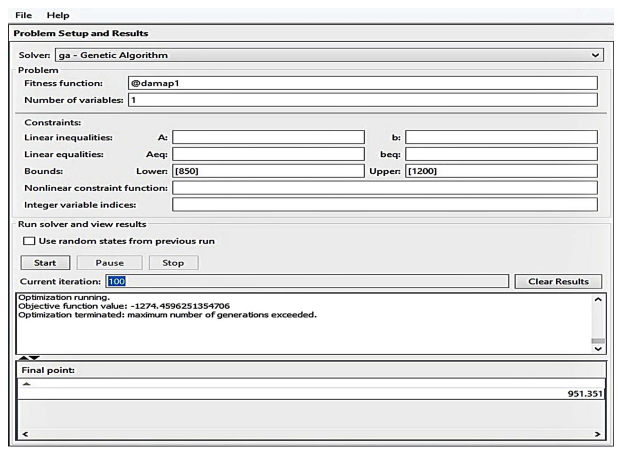
جدول ۳. فشارهای جزئی مولکول‌های کاتد به دست آمده از الگوریتم ژنتیک.

O_2,cat	CO_2,cat
۰٫۴۵۷	۰٫۵۴۳

در شکل ۶ نیز چگالی توان به چگالی جریان پیل سوختی کربنات مذاب که به رنگ سیاه و موتور استرلینگ به رنگ قرمز و سیستم هیبریدی به رنگ آبی را مشاهده می‌کنید.

در شکل ۵ بیشترین مقدار بازده سیستم هیبریدی در حدود ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع است و در شکل ۶ بیشترین چگالی توان سیستم هیبریدی در حدود ۴۰۰۰ آمپر بر متر مربع است.

با استفاده از الگوریتم ژنتیک متلب و ثابت فرض کردن انرژی فعال‌سازی آند و کاتد پیل سوختی کربنات مذاب مقادیر فشارهای جزئی مولکول‌های آند و کاتد را به دست می‌آوریم. البته در این جا از فشارهای جزئی نیتروژن و بخار آب موجود در هوا صرف‌نظر شده است. در جدول ۲ فشارهای جزئی مولکول‌های آند به دست آمده از الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است و در جدول ۳ فشارهای جزئی مولکول‌های



شکل ۴. بیشترین چگالی فشار بر اساس دما.

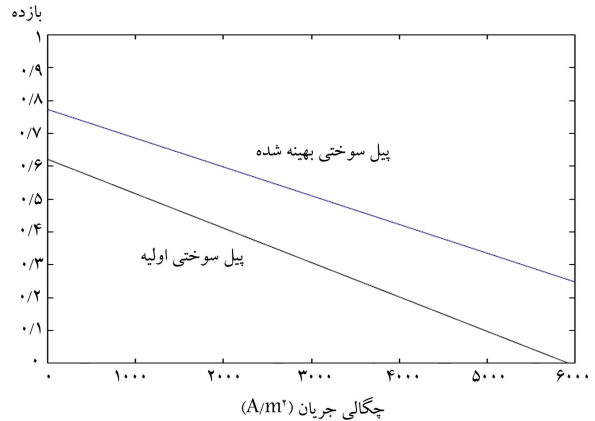
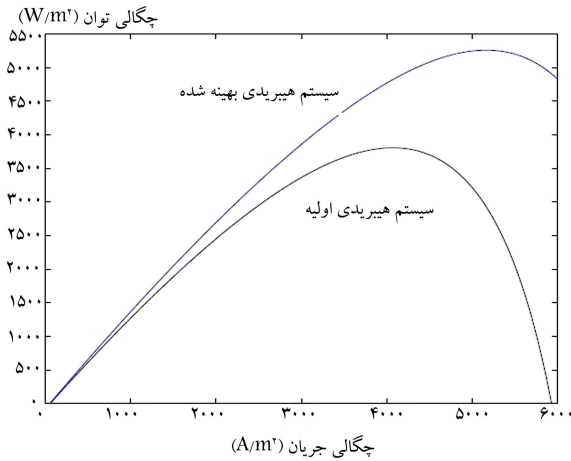
۵. تحلیل نرم‌افزار

با توجه به جدول ۱ و روابط گفته شده می‌توان با نرم‌افزار متلب شکل‌های بازده به چگالی جریان و چگالی توان به چگالی جریان را رسم کرد. اکنون در شکل ۵ بازده به چگالی جریان پیل سوختی کربنات مذاب به رنگ سیاه و موتور استرلینگ به رنگ قرمز و سیستم هیبریدی به رنگ آبی را مشاهده می‌کنید:

اما با فشارهای جزئی داده شده در جدول ۱ می‌توان با استفاده از الگوریتم ژنتیک دو نتیجه دیگر را به دست آورد. بیشترین بازده سیستم هیبریدی بر اساس تغییرات دما و چگالی جریان در جدول ۴ آورده شده است که بیشترین بازده در حدود ۷۸/۶۱٪ است. در مورد تغییرات دما که باعث بیشترین چگالی فشار سیستم هیبریدی می‌شود، این مقدار با در نظر گرفتن چگالی جریان معادل ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع است (جدول ۵). ولتاژ برگشت‌ناپذیر پیل سوختی کربنات مذاب در دو شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. شکل ۱۲ بر حسب چگالی جریان و شکل ۱۳ بر حسب دما در چگالی جریان ۱۰ آمپر بر متر مربع است.

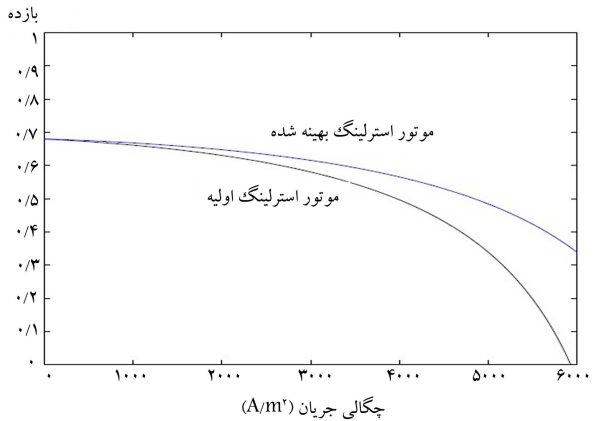
کاتد آورده شده است. در شکل ۷ بازده پیل سوختی کربنات مذاب در دو حالت بهینه شده به وسیله‌ی تغییر در فشارهای جزئی و حالت اولیه بررسی شده است. در شکل ۸ بازده موتور استرلینگ به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک نسبت به حالت اولیه آن بررسی شده است. در شکل ۹ نیز به بررسی بازده سیستم هیبریدی در دو حالت با الگوریتم ژنتیک و اولیه آن پرداخته‌ایم.

در شکل ۱۰ چگالی توان حالت بهینه شده‌ی سیستم هیبریدی با الگوریتم ژنتیک نسبت به حالت اولیه‌ی آن بیان شده است. در شکل ۱۱ نیز درصد‌های دیگر فشارهای جزئی نسبت به الگوریتم ژنتیک بررسی شده است.

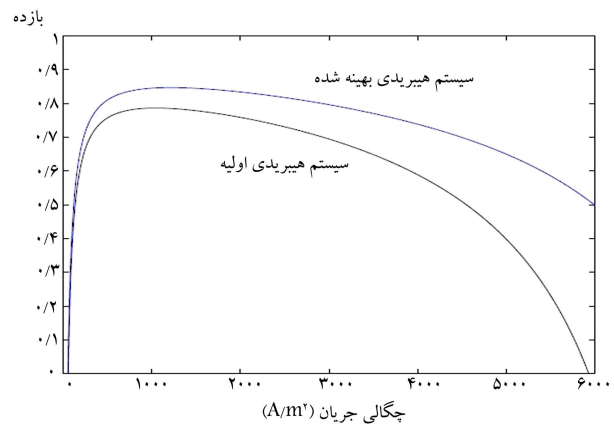
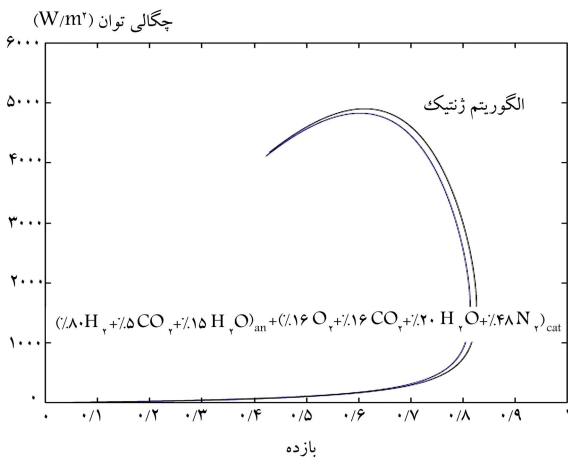


شکل ۷. بهینه شده پیل سوختی کربنات مذاب به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک

شکل ۱۰. چگالی توان به چگالی جریان حالت بهینه شده سیستم هیبریدی و حالت اولیه آن.



شکل ۸. بازده به چگالی جریان بهینه شده موتور استرلینگ و حالت اولیه آن.



شکل ۱۱. درصد فشارهای جزئی دیگر نسبت به درصد فشارهای جزئی الگوریتم ژنتیک.

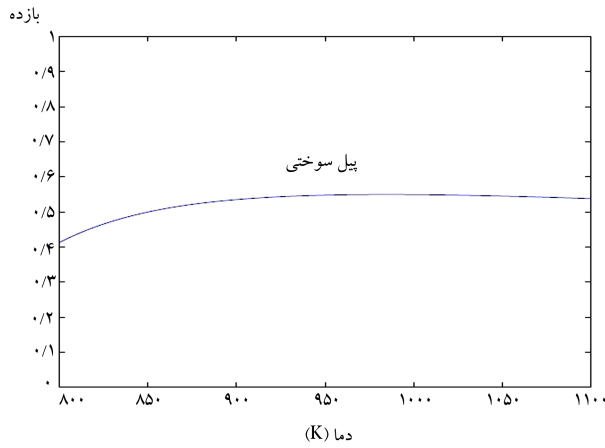
جدول ۴. بیشترین بازده بر اساس دما و چگالی جریان.

چگالی جریان	دما (کلوین)
A/m^2 ۱۰/۱۵/۰۳۵	۸۸۵,۷۸۸

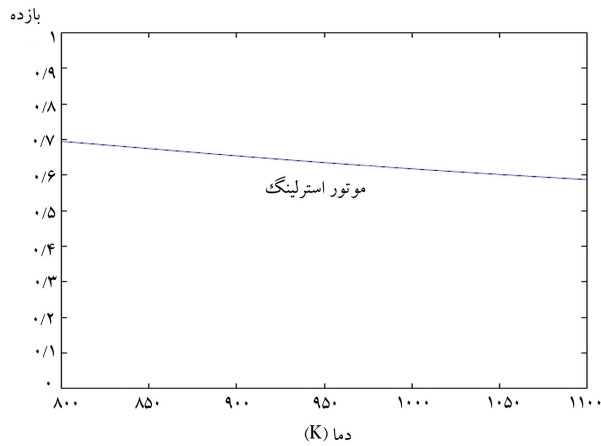
جدول ۵. بیشترین چگالی فشار بر حسب دما.

دما (کلوین)
۹۵۱,۳۵۱

شکل ۹. بازده به چگالی جریان بهینه شده سیستم هیبریدی و حالت اولیه آن.



شکل ۱۴. بازده بر حسب دما برای پیل سوختی کربنات مذاب.



شکل ۱۵. بازده بر حسب دما برای موتور استرلینگ.

بازده برگشت پذیر موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی:

$$\eta_{engine} = \%.67,18$$

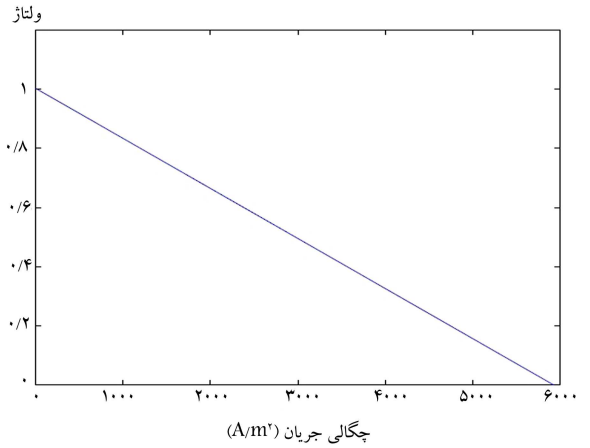
$$\eta_{hybrid} = \%.94,21$$

حالت انتگرالیونی بازده سیستم هیبریدی: از نوآوری این مقاله حالت انتگرالیونی بازده سیستم هیبریدی در دمای مشخص است.

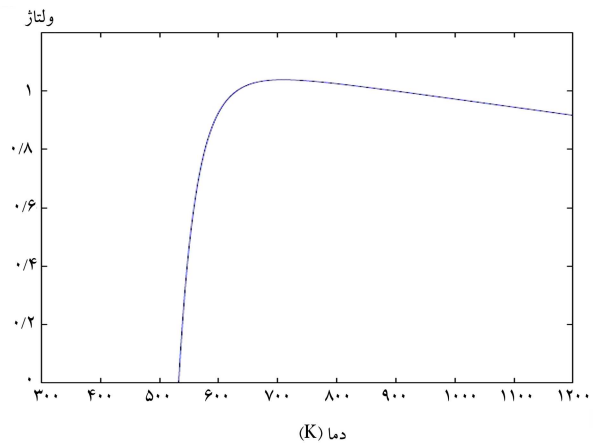
شکل ۱۴ مربوط به بازده بر حسب دما برای پیل سوختی کربنات مذاب بین دما $800 \leq T \leq 1100 \text{ K}$ و شکل ۱۵ مربوط به بازده بر حسب دما برای موتور استرلینگ بین دما $800 \leq T \leq 1100 \text{ K}$ است. شکل ۱۶ مربوط به بازده بر حسب دمای سیستم هیبریدی در بین دمای گفته شده است. و در پایان، شکل ۱۷ نمودارهای پیل سوختی کربنات مذاب، موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی را در چگالی جریان 850 آمپر بر متر مربع نمایش می دهد. همان طور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود سیستم هیبریدی در محدوده دمای گفته شده دارای یکنواختی و انتگرالیونی خاصی است.

۶. نتیجه گیری

بیشترین بازده پیل سوختی کربنات مذاب در حالت اولیه در حدود $\%.62,09$ که حالت با الگوریتم ژنتیک پیل سوختی کربنات مذاب $\%.77,26$ است. بیشترین بازده



شکل ۱۲. ولتاژ برگشت ناپذیر پیل سوختی کربنات مذاب بر حسب چگالی جریان.



شکل ۱۳. ولتاژ برگشت ناپذیر پیل سوختی کربنات مذاب بر حسب دما در چگالی جریان 10 آمپر بر متر مربع.

بیشینه کار، بازده و ولتاژ برگشت پذیر پیل سوختی کربنات مذاب:

$$W_{max} = -\Delta G = 235530 \text{ (KJ)}$$

$$\eta_{cell} = \frac{-\Delta G}{-\Delta H} = \frac{W_{max}}{-\Delta H} = \%.82,35$$

$$\eta_{cell} \times 100 = 82,35$$

$$E_{Nernst} =$$

$$\frac{-\Delta G}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2,an}(P_{O_2,cat})^{\frac{1}{2}} P_{CO_2,cat}}{P_{H_2O,an} P_{CO_2,an}}\right) = 1,2077 \text{ (v)}$$

کار، بازده و ولتاژ برگشت پذیر پیل سوختی کربنات مذاب در دمای عملیاتی:

$$W = -\Delta G = 220240 \text{ (KJ)}$$

$$\eta = \frac{-\Delta G}{-\Delta H_s} = \frac{W}{-\Delta H_s} = \%.77,01$$

$$\eta \times 100 = \%.77,01$$

$$E_{Nernst} =$$

$$\frac{-\Delta G}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln\left(\frac{P_{H_2,an}(P_{O_2,cat})^{\frac{1}{2}} P_{CO_2,cat}}{P_{H_2O,an} P_{CO_2,an}}\right) = 1,1022 \text{ (v)}$$

جزئی که در شکل ۱۱ آمده^[۹] بررسی کنیم، بیشترین بازده سیستم هیبریدی مقاله یاد شده در حدود ۸۱٫۳۷٪ است که درصدهای با الگوریتم ژنتیک در حدود ۳٫۲۸٪ افزایش داشته است.

بازده برگشت‌ناپذیر پیل سوختی کربنات مذاب در بیشترین حالت خود دارای مقدار ۶۲٫۹٪ است که بیشینه بازده برگشت‌پذیر پیل سوختی کربنات مذاب ۸۲٫۳۵٪ و بازده برگشت‌پذیر در دمای عملیاتی آن ۷۷٫۱٪ است. بیشترین ولتاژ برگشت‌ناپذیر ۱ ولت است ولی بیشینه ولتاژ برگشت‌پذیر ۱٫۲۰۷۷ ولت و ولتاژ برگشت‌پذیر در دمای عملیاتی ۱٫۱۰۲۲ ولت است. بازده برگشت‌پذیر موتور استرلینگ ۶۷٫۱۸٪ و بازده برگشت‌پذیر سیستم هیبریدی برابر ۹۴٫۲۱٪ است.

با توجه به شکل‌های نشان داده شده مشخص شد که بازده به دما برای پیل سوختی کربنات مذاب به صورت صعودی است و بازده به دما برای موتور استرلینگ به صورت نزولی است که با توجه به این که در سیستم هیبریدی مشتمل بر پیل سوختی کربنات مذاب و موتور استرلینگ در محدوده دمایی $80^{\circ}K \leq T \leq 110^{\circ}K$ نمودار بازده به دما به صورت آنتگراسیون و یکپارچه است.

پیشنهاد می‌شود برای افزایش بازده پیل سوختی کربنات مذاب و متناسب با آن افزایش بازده سیستم هیبریدی با توجه به این که قسمت آند پیل سوختی کربنات مذاب شامل آب و دی‌اکسید کربن و هیدروژن است، فشار جزئی دی‌اکسید کربن در آند هرچه به صفر نزدیک‌تر شود درصد بازده پیل سوختی بالاتر می‌رود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی با جداسازی مولکول دی‌اکسید کربن در آند فشار جزئی دی‌اکسید کربن را در آند به صفر رسانند؛ یعنی طوری پیل سوختی ساخته شود که فشار جزئی دی‌اکسید کربن صفر شود. با این کار درصد بازده سیستم هیبریدی به طور تقریبی به ۸۸٫۶۴٪ می‌رسد.

۷. تشکر و قدردانی

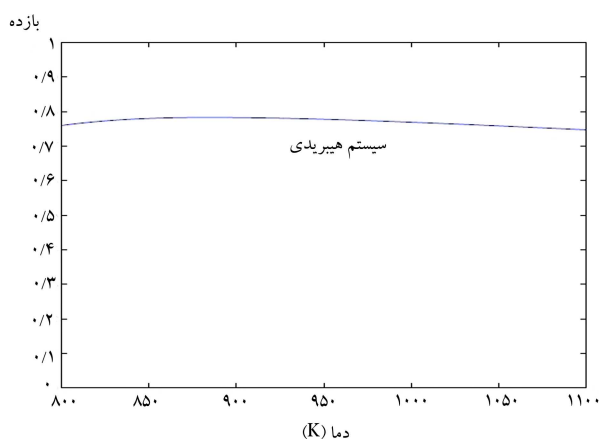
این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد است که از حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی برخوردار بوده است.

پانویس

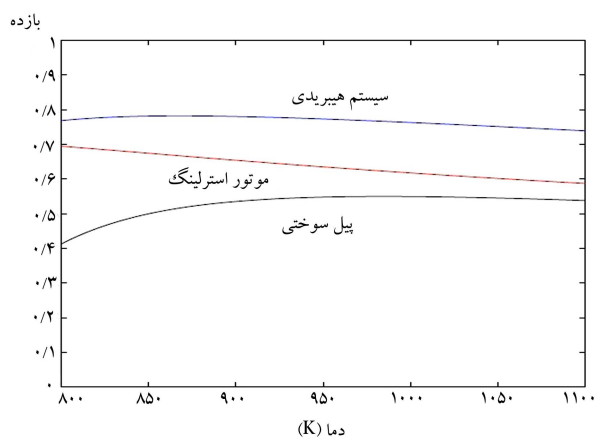
1. Genetic Algorithm

منابع (References)

1. Neef, H.J. "International overview of hydrogen and fuel cell research", *Journal of Energy*, **34**, pp. 327-33 (2009).
2. Heinz, B. and Henkel, J. "Balancing wind energy and participating in electricity markets with a fuel cell population", *Journal of Energy*, **48**, pp. 188-95 (2012).
3. Feng, L., Cai, W., Li, C. and et al. "Fabrication and performance evaluation for a novel small planar passive



شکل ۱۶. بازده بر حسب دما برای سیستم هیبریدی.



شکل ۱۷. بازده بر حسب دما برای پیل سوختی، موتور استرلینگ و سیستم هیبریدی.

سیستم هیبریدی در حالت اولیه 78.6% که حالت با الگوریتم ژنتیک 84.65% است. اگر درصدهای فشارهای جزئی الگوریتم ژنتیک را با درصدهای فشارهای

direct methanol fuel cell stack", *Journal of Fuel*, **94**, pp. 401-8 (2012).

4. Zhang, H., Lin, G. and Chen, J. "Performance evaluation and parametric optimum criteria of an irreversible molten carbonate fuel cell - heat engine hybrid system", *Journal of Electrochem Sci*, **6**, pp. 4714-29 (2011).
5. Verda, V. and Sciacovelli, A. "Optimal design and operation of a biogas fueled MCFC (molten carbonate fuel cells) system integrated with an anaerobic digester", *Journal of Energy*, **47**, pp. 150-7 (2012).
6. Zhang, H., Su, S., Lin, G. and et al. "Performance analysis and multi - objective optimization of a molten carbonate fuel cell - Braysson heat engine hybrid system", *Journal of Electrochem Sci*, **7**, pp. 3420-35 (2012).
7. Brouwer, J., Jabbari, F., Leal, E.M. and et al. "Analysis of a molten carbonate fuel cell: numerical modeling

- and experimental validation”, *Journal of Power Sources*, **158**, pp. 213-24 (2006).
8. Kim, H., Bae, J. and Choi, D. “An analysis for a molten carbonate fuel cell of complex geometry using three – dimensional transport equations with electrochemical reactins”, *Journal of Hydrogen Energy*, **38**, pp. 4782-91 (2013).
 9. Chen, L. Zhang, H., Gao, S. and et al. “Performance optimum analysis of an irreversible molten carbonate fuel cell – stirling heat engine hybrid system”, *Journal of Energy*, **64**, pp. 923-930 (2014).
 10. Chen, J., Yan, Z., Chen, L. and et al. “Efficiency bound of a solar-driven Stirling heat engine system”, *Journal of Energy Res*, **22**, pp. 805-12 (1998).
 11. Zemansky, M.W., *Heat and Thermodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill (1968).
 12. Zhang, X., Guo, J. and Chen, J. “Influence of multiple irreversible losses on the performance of a molten carbonate fuel cell-gas turbine hybrid system”, *Journal of Hydrogen Energy*, **37**, pp. 8664-71 (2012).
 13. Desideri, U., Proietti, S., Sdringola, P. and et al. “MCFC-based CO2 capture system for small scale CHP plants”, *Journal of Hydrogen Energy*, **37**, pp. 19295-303 (2012).
 14. Masoud, R. “Thermodynamic analysis of SOFC (solid oxide fuel cell)-Stirling hybrid plants using alternative fuels”, *Journal of Energy* (2013).
 15. Zhao, Y., Ou, C. and Chen, J. “A new analytical approach to model and evaluate the performance of a class of irreversible fuel cells”, *Journal of Hydrogen Energy*, **33**, pp. 4161-70 (2008).
 16. Zhao, Y. and Chen, J. “Modeling and optimization of a typical fuel cell - heat engine hybrid system and its parametric design criteria”, *Journal of Power Sources*, **186**, pp. 96-103 (2009).
 17. Hitchings, C., *Fuel cell handbook*. 6th ed. Virginia: EG&G Technical Services (2002).
 18. Aslan Nezhad, H., Sadr Ameli, S.M. and Zhiani, M. “Fuel cell performance review of the thermodynamic point of view and compare it with the car Carnot heat”, *The Fourth Seminar of Iranian Fuel Cell* (2010).