

# مدلسازی و بهینه‌سازی چندهدفه پیل سوختی اکسید جامد براساس هزینه واحد انرژی الکتریکی تولیدی، بازدهی و توان خروجی

عاطفه بهزادی فروغ، رامین روشندل\*

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی

پیام‌نگار: Roshandel@sharif.edu

## چکیده

در زمینه سیستم‌های تولید توان، سیستم‌هایی که بر اساس پیل سوختی کار می‌کنند به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیستم‌هایی که تنها بر پایه سیکل ترمودینامیکی کار می‌کنند، مطرح می‌باشد. در این مقاله یک مدل (فنی-اقتصادی) برای مدلسازی ۱۰ استک پیل سوختی اکسید جامد<sup>۱</sup> (SOFC) و بهینه‌سازی عملکرد این سیستم با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> ارائه خواهد شد. در قسمت بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی چند هدفه<sup>۳</sup> (MOO) که به طور معین، نقاط مطلوب عملکردی سیستم SOFC را بدست می‌آورد، استفاده شده است. این روش اجازه خواهد داد تا بهینه‌سازی سیستم مورد نظر با توجه به دو تابع هدف که یکبار به صورت پیشینه‌سازی توان الکتریکی و کمینه‌سازی قیمت همتراز شده‌ی برق تولیدی و بار دیگر به صورت پیشینه‌سازی بازدهی الکتریکی سیستم و کمینه‌سازی قیمت همتراز شده‌ی برق تولیدی در نظر گرفته خواهد شد، صورت می‌گیرد. بهینه‌سازی‌ها نشان خواهند داد که در مسأله اول پیشینه توان خروجی سیستم ۷۸/۸ kW در قیمت برق ۰/۵۶ (\$/kWh) و همچنین کمینه قیمت برق ۰/۳۲ (\$/kWh) در توان ۳۱/۵۴ kW صورت خواهد گرفت. همچنین در مسأله بهینه‌سازی دوم، پیشینه بازدهی سیستم ۰/۵۲ در قیمت برق معادل ۰/۴۶ (\$/kWh) و کمینه قیمت برق ۰/۳۲ (\$/kWh) در بازدهی معادل ۰/۴۴ محاسبه شده است. در انتها تحلیل حساسیت بر روی مقادیر مختلف ضریب مصرف سوخت<sup>۴</sup> ارائه می‌شود. شایان ذکر است که بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند هم به عنوان یک ابزار تحلیلی پیشرفته و هم به عنوان یک عامل حمایت‌کننده برای تصمیم‌گیرنده‌ای که با چنین سیستمی کار می‌کند، در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چند هدفه، پیل سوختی اکسید جامد، مدلسازی، تحلیل حساسیت

## ۱- مقدمه

این میان هیچ مرحله میانی نظیر تولید حرارت به وسیله سوزاندن سوخت و تبدیل حرارت به انرژی مکانیکی توسط موتور حرارتی، وجود ندارد. در نتیجه بسیاری از محدودیت‌های ناشی از قوانین ترمودینامیکی از میان می‌رود. در میان انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل‌های سوختی اکسید جامد به علت کاربرد نیروگاهی

پیل‌های سوختی وسائل الکتروشیمیایی هستند که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را به صورت مستقیم به برق تبدیل می‌کنند. در

1. Solid Oxide Fuel Cell
2. Genetic Algorithm
3. Multi Objective Optimization
4. Fuel Utilization

ساختار کار کردند و پارامترهای بهینه‌سازی آنها مانند قطر تخلخل و ضخامت لایه عملکردی کاتد، دارای سایز ذره‌ای بوده است. در بهینه‌سازی پیل سوختی واحد، یوان و همکارانش [۱۳] بر روی تک سلول SOFC بهینه‌سازی انجام دادند که پارامترهای آنها نظیر هندسه سلول، پارامترهای طراحی، ساختار سلول و شرایط عملکردی آن بوده است. در بهینه‌سازی سیستمی، دینور و کالیس و همکارانشان [۱۴ و ۱۵]، سیستم‌هایی با ساختارها و اتصالات مختلف و همچنین با شرایط عملکردی متفاوت را بهینه کردند.

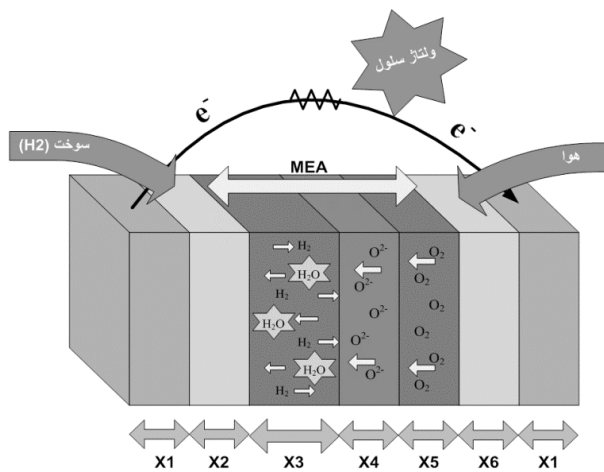
بهینه‌سازی چند هدفه اطلاعات لازم را برای بررسی و سنجش سیستم و همچنین امکان جابجایی‌های مختلف بر روی توابع هدف ناسازگار را فراهم می‌آورد. با این وجود تلاش‌های اندکی در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه استک‌های SOFC انجام شده است. بارتو و همکارانش [۱۶] بر روی سیستم تولید توان SOFC بهینه‌سازی چند هدفه انجام دادند و مورد مطالعه آنها منطقه‌ای در کالیفرنیا جنوبی بوده است. پالازی و همکارانش [۱۷] نیز بر روی سیستم SOFC بهینه‌سازی چند هدفه انجام دادند. توابع بهینه‌سازی آنها بازدهی الکتریکی سیستم و قیمت سرمایه گذاری به ازای واحد توان تولیدی (\$/kW) بوده است. آتوسیر و همکارانش [۱۸] بهینه‌سازی چند هدفه مشابهی را بر روی سیستم هیبریدی SOFC و توربین گازی<sup>۵</sup> انجام دادند. اگرچه قیمت هیدروژن بر روی قیمت نهایی واحد انرژی الکتریکی تولیدی (\$/kWh) تأثیر بسیار زیادی دارد اما اغلب مقالات قیمت و میزان مصرف هیدروژن (ضریب مصرف سوخت) را نادیده می‌گیرند. بنابراین اکنون در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه استک‌های SOFC نیازهایی وجود دارد که تابع هدف قیمت آنها علاوه بر قیمت سرمایه گذاری قیمت سوخت را نیز شامل شود. در مقاله حاضر یک مدل فنی اقتصادی برای ۱۰ استک SOFC ارائه خواهد شد سپس بهینه‌سازی چند هدفه بر روی این سیستم توسط الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. در اینجا به طور کلی دو دسته بهینه‌سازی انجام می‌شود که در دسته اول توابع هدف به صورت کمینه‌سازی قیمت همتراز شده برق (\$/kWh) و بیشینه‌سازی بازدهی الکتریکی سیستم در نظر گرفته می‌شوند. توابع هدف دسته دوم نیز شامل کمینه‌سازی قیمت همتراز شده برق (\$/kWh) و بیشینه‌سازی توان سیستم می‌باشد. نمودارهای Pareto برای توابع (بازدهی- قیمت) و همچنین برای (توان- قیمت) رسم خواهد شد. در انتهای کار تحلیل

شان در تولید توان، اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند. همچنین به علت دمای عملکردی بالای آنها که بین ۶۰۰°C تا ۱۱۰۰°C می‌باشد، می‌توان از حرارت این نوع پیل‌های سوختی نیز استفاده کرد و این نوع سیستم‌ها گزینه مناسبی برای تولیدات پراکنده خواهند بود. از مزایای این نوع پیل سوختی نسبت به سایر پیل‌های سوختی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- به علت عدم نیاز به کاتالیست فلزی گران قیمت، ارزان تر هستند و نسبتاً دارای طول عمر بالاتری می‌باشند [۱]. ۲- قابلیت تبدیل سوخت‌های متنوع (متان، گاز مصنوعی<sup>۱</sup>، پروپان، آمونیاک، متانول) به هیدروژن در داخل پیل سوختی که باعث کاهش سایز مخزن مورد نیاز می‌باشد [۲]. ۳- گازهای خروجی اگزوزی بالایی برای تولید توان اضافی دارند [۳]. ۴- انتشار آلاینده‌ها و آلودگی صوتی پایین. ۵- دارای بازدهی تبدیل انرژی بالا. تحقیقات زیادی در زمینه امکان‌سنجی استفاده از این سیستم‌ها و همچنین بررسی شرایط عملکردی آنها انجام شده است. سورنتینو و همکارانش مدل یک بعدی برای SOFC صفحه‌ای را ارائه دادند که تأثیر برخی از پارامترهای عملکردی مهم مانند دما، فشار و ضریب مصرف سوخت را ارزیابی می‌کند [۴]. جانارد هانان [۵] یک مدل ریاضی برای محاسبه طول ناحیه سه‌گانه<sup>۲</sup> در الکترودهای متخلخل ترکیبی<sup>۳</sup> در SOFC، معرفی کرد. آکایا و بست و همکارانشان [۶ و ۷] مطالعات اعتبار سنجی را برای این نوع پیل سوختی انجام داده‌اند. همچنین در زمینه کارهای تجربی، کاستاماگنا و همکارانش [۸] مدلی ارائه دادند که با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت می‌کرد. باو و یوبرتینی [۹] یک مدل عددی کامل سه بعدی و وابسته به زمان را برای SOFC ارائه دادند که پدیده‌های مختلفی که در هریک از قسمت‌های پیل سوختی اتفاق می‌افتد را در بر می‌گیرد. در مقیاس بزرگ رکناگل و خالل و همکارانشان [۱۰ و ۱۱] مدلی سه بعدی را برای استک SOFC ارائه دادند که مسیرهای عبور جریان الکتریکی و گازها را داخل MEA<sup>۴</sup> بررسی می‌کند. مطالعات بهینه‌سازی بر روی SOFC زیاد نیستند. به هر حال با توجه به مقالات موجود، بهینه‌سازی SOFC به سه طبقه تقسیم بندی می‌شوند: بهینه‌سازی ریزساختار، پیل سوختی واحد و سیستم SOFC. دیسر و همکارانش [۱۲] بر روی بهینه‌سازی ریز

1. Syngas  
2. Three Phase Boundary  
3. Composite  
4. Membrane Electrode Assembly

5. Gas Turbine

هیدروژن در ورودی و خروجی کانال سوخت و همچنین میزان مصرف آن بر اساس جریان عملگردهی بدست می‌آید:



شکل ۱- ساختار تک سلول SOFC

$$n_{H_2, in} = \frac{I}{nF\gamma_f} \quad (3)$$

$$n_{H_2, out} = \frac{I}{nF} \left( \frac{1}{\gamma_f} - 1 \right) \quad (4)$$

$$n_{H_2} = \frac{I}{nF} \quad (5)$$

$n$  در معادلات بالا تعداد الکترونیایی است که به ازای هر مول واکنش‌دهنده (هیدروژن یا اکسیژن) منتقل می‌شود که در الکتروند آند برابر ۲ و در الکتروند کاتد برابر ۴ می‌باشد. در روشی مشابه دبی مولی اکسیژن در ابتدا و انتهای کانال هوا و همینطور مقدار مصرف اکسیژن در واکنش‌های الکتروشیمیایی بر حسب جریان الکتریکی به صورت زیر خواهد بود:

$$n_{O_2, in} = \frac{I}{nF} \lambda_{air} \quad (6)$$

$$n_{O_2, out} = (\lambda_{air} - 1) \frac{I}{nF} \quad (7)$$

$$n_{O_2} = \frac{I}{nF} \quad (8)$$

حساسیت بر روی مصارف مختلف هیدروژن (خریب مصرف سوخت) انجام خواهد شد. بر اساس نمودارهای پارتو<sup>۱</sup> می‌توان میزان تأثیر مصرف سوخت را بر روی قیمت نهایی انرژی الکتریکی و توابع دیگر بررسی کرد.

## ۲- ساختار سیستم

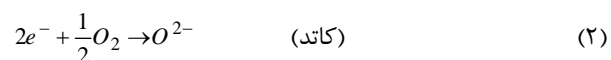
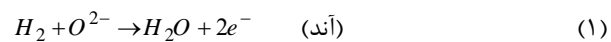
ساختار تک سلول SOFC در شکل (۱) نشان داده شده است. این ساختار شامل ۶ جزء می‌باشد: ۱- صفحه دو قطبی- اتصال‌دهنده ( $x_1$ )، ۲- کانال سوخت ( $x_2$ )، ۳- الکتروند آند ( $x_3$ )، ۴- لایه الکترولیت ( $x_4$ )، ۵- الکتروند کاتد ( $x_5$ )، ۶- کانال اکسیژن ( $x_6$ ). سوخت و هوایی که از طریق کانال‌ها تأمین می‌شوند، به ترتیب داخل الکترودهای آند و کاتد نفوذ پیدا می‌کنند تا به جایی برسند که به صورت مجزا در ناحیه تداخل رسانای یونی/رسانای الکترونی/رسانای گازی (ناحیه سه گانه TPB)، در واکنش‌های الکتروشیمیایی شرکت کنند. صفحه دو قطبی، یک سری از هادی‌های الکتریکی را برای سلول‌های مجاور و یا مدار الکتریکی بیرونی فراهم می‌آورد و همزمان به صورت یک مانع ورود گاز بین کانال‌های سوخت و هوای سلول‌های مجاور، عمل می‌کند. در این مقاله هیدروژن خالص و هوا به ترتیب به عنوان سوخت و اکسیدکننده در نظر گرفته شده‌اند.

## ۳- مدلسازی ریاضی

### ۳-۱-۳ مدل پیل سوختی اکسید جامد

#### ۳-۱-۱-۳ موازنه جرمی در کانال‌های سوخت و هوای SOFC

در پیل سوختی اکسید جامد دو واکنش الکتروشیمیایی در الکترودهای آند و کاتد انجام می‌شود که توسط معادلات زیر بیان می‌شوند:



هیدروژن و اکسیژن به ترتیب توسط کانال‌های سوخت و هوا تأمین می‌شود. بر اساس معادلات واکنش‌های الکتروشیمیایی دبی مولی

1. Pareto

$$V_{OCV} = \frac{-\left(H_{H_2O} - H_{H_2} - \frac{1}{2}H_{O_2}\right) + T \times \left(S_{H_2O}^0 - S_{H_2}^0 - \frac{1}{2}S_{O_2}^0\right) - RT \ln\left[\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}(P_{O_2})^{1/2}}\right]}{2F} \quad (14)$$

در این مقاله، اکسیدکننده که در کانال جریان می‌یابد، هوا می‌باشد که فرض می‌شود تنها از اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است. دبی مولی نیتروژن در ورودی و خروجی کانال هوا برابر است با:

$$n_{N_2,in} = n_{N_2,out} = \frac{I \lambda_{air} X_{N_2,in}}{n F X_{O_2,in}} \quad (9)$$

در کانال سوخت، کسر مولی میانگین برابر است با:

$$X_{H_2O} = \frac{\gamma_f}{2}, \quad X_{H_2} = 1 - \frac{\gamma_f}{2} \quad (10)$$

در کانال اکسیدکننده، کسر مولی میانگین برابر است با:

$$X_{O_2} = \frac{2\lambda_{air} X_{O_2,in} - X_{O_2,in} - X_{O_2,in}^2}{2(\lambda_{air} - X_{O_2,in})} \quad (11)$$

$$X_{N_2} = \frac{2\lambda_{air} X_{N_2,in} - X_{O_2,in} X_{N_2,in}}{2(\lambda_{air} - X_{O_2,in})} \quad (12)$$

$$\eta_{ohm,j} = I \beta_j, \quad j = 1,4 \quad (15)$$

$$\eta_{ohm,j} = \frac{I(A_{j,opt} - L_y L_z) L_{j,opt}}{2A_{j,opt} L_y L_z (1 - \phi_j) \sigma_4} + \frac{I(L_j - L_{j,opt})}{L_y L_z (1 - 1.8\phi_j) \sigma_i}, \quad j = 3,5 \quad (16)$$

عبارت اول سمت راست معادله (۱۶)، افت اهمیک را در نواحی سه گانه فعال و در مکانی که مقاومت هدایت یونی غالب است بیان می‌کند. عبارت دوم همین معادله به افت اهمیک مربوط به سایر مکان‌های آند و کاتد، جاهایی که مقاومت هدایت الکترونی غالب می‌باشند، اشاره می‌کند.  $\beta_4$  و  $\beta_1$  مقاومت‌های صفحات دو قطبی و الکترولیت هستند که بر اساس ویژگی‌های مواد و هندسه سلول به صورت زیر بدست می‌آیند [۱۹]:

$$\beta_1 = \frac{L_1}{L_y L_z \sigma_1} + \frac{L_2}{(1 + n_{ch}) L_t L_y \sigma_1} + \frac{L_6}{(1 + n_{ch}) L_t L_z \sigma_1} \quad (17)$$

$$\beta_4 = \frac{L_4}{L_y L_z \sigma_4} \quad (18)$$

$A_{j,opt}$  مساحت ناحیه فعال TPB می‌باشد و با معادله (۱۹) بدست می‌آید:

### ۳-۱-۲ مدل الکتروشیمیایی

ولتاژ عملکردی سلول با کم کردن تمامی افت‌ها (فعالسازی، اهمیک و غلظتی) از ولتاژ استاندارد نرنست<sup>۱</sup> در دما و فشار عملکردی داده شده بدست خواهد آمد. افت‌ها تابعی از جریان، دما و فشار عملکردی و همچنین ساختار سلول می‌باشند:

$$V = V_{OCV} - \left( \sum_j \eta_{ohm,j} + \eta_{conc,3} + \eta_{conc,5} + \eta_{act,3} + \eta_{act,5} \right), \quad j = 1,3,4,5 \quad (13)$$

در معادله بالا،  $\eta_{ohm,j}$  افت اهمیک در قسمت‌های جامد سلول و  $V_{OCV}$  ولتاژ مدار باز سلول می‌باشد. معادله برای تعیین ولتاژ مدار باز بر اساس این فرض که هر دو واکنش‌های الکتروشیمیایی در دمای پیل سوختی انجام می‌شوند، به صورت زیر تعریف می‌شود:

1. Nernst

$$\eta_{conc,c} = \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{P_{O_2}}{P_{O_2,TPB}} \right) \quad (26)$$

$$\eta_{conc,a} = \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{H_2O,TPB}}{P_{H_2,TPB} P_{H_2O}} \right) \quad (27)$$

در این مطالعه، برای محاسبه افت‌های فعالسازی از معادله (بالتز-والمر) استفاده شده است [۲۳]:

$$i = i_{o,j} \left[ \exp \left( \frac{\alpha n F}{RT} \eta_{act,j} \right) - \exp \left( - \frac{(1-\alpha) n F}{RT} \eta_{act,j} \right) \right], \quad j = 3,5 \quad (28)$$

افت‌های فعالسازی،  $\eta_{act,j}$  که انرژی مورد نیاز برای فعال شدن نیم واکنش‌های الکتروشیمیایی را فراهم می‌کند بر اساس معادله (بالتز-والمر) و به صورت معادله (۲۹) تعریف می‌شود:

$$\eta_{act,j} = \frac{RT}{\alpha n F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{i_{0,j}} \right), \quad j = 3,5 \quad (29)$$

n در معادله بالا برابر ۲ و  $\alpha$  که ضریب انتقال بار را نشان می‌دهد در اینجا مقدار نوعی ۰/۵ را می‌گیرد.  $i_{0,j}$  که نشان دهنده چگالی جریان تبدالی میباید به صورت معادله زیر تعریف شده است:

$$i_{0,j} = \frac{RT}{nF} \delta_j \exp \left( - \frac{E_j}{RT} \right), \quad j = 3,5 \quad (30)$$

چگالی توان الکتریکی تک سلول SOFC برابر است با:

$$P_{elec,cell} = V \times i \quad (31)$$

مقادیر پارامترهای فیزیکی و ثابت‌هایی که در این مدل و برای رسم نمودار قطبش تک سلول SOFC استفاده شده است، در جدول (۱) آورده شده است.

$$A_{j,opt} = (1 + 2L_{j,opt} \phi_j / D_{P,j}) L_y L_z \quad (19)$$

$D_{P,j}$  قطر میانگین حفره‌های موازی در دو الکتروود است و توسط معادله (۲۰) تعریف می‌شود:

$$D_{P,j} = D_{W,j} \phi_j / (1 - \phi_j) \quad (20)$$

$P_{TPB}$  فشارهای نواحی سه گانه می‌باشند که به فشار جزئی واکنش‌دهنده‌ها و محصولات در TPB اشاره می‌کنند. فشارهای نواحی سه گانه توسط کیم و اوگیر و همکارانشان توسط معادلات (۲۱) - (۲۳) بیان شده است [۲۰ و ۲۱]:

$$P_{H_2O,TPB} = P_f X_{H_2O} + \frac{RT \psi_3 L_3 I}{2FD_3 \phi_3 L_y L_z} \quad (21)$$

$$P_{H_2,TPB} = P_f X_{H_2} - \frac{RT \psi_3 L_3 I}{2FD_3 \phi_3 L_y L_z} \quad (22)$$

$$P_{O_2,TPB} = P_{air} - (P_{air} - X_{O_2} P_{air}) \exp \left( \frac{RT \psi_5 L_5 I}{4FD_5 \phi_5 P_{air} L_y L_z} \right) \quad (23)$$

ضرایب نفوذ در الکتروود آند و کاتد از طریق معادلات زیر بدست می‌آیند [۲۲]:

$$D_3 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{H_2} + M_{H_2O})^{\frac{1}{2}}}{P_f (2M_{H_2} M_{H_2O})^{\frac{1}{2}} (v_{H_2}^{\frac{1}{3}} + v_{H_2O}^{\frac{1}{3}})^2} \quad (24)$$

$$D_5 = \frac{1.43 \times 10^{-7} T^{1.75} (M_{O_2} + M_{N_2})^{\frac{1}{2}}}{P_{air} (2M_{O_2} M_{N_2})^{\frac{1}{2}} (v_{O_2}^{\frac{1}{3}} + v_{N_2}^{\frac{1}{3}})^2} \quad (25)$$

افت‌های غلظتی،  $\eta_{conc,j}$  در الکتروودهای آند و کاتد توسط اوگیر و همکارانش به صورت معادله‌های (۲۶) و (۲۷) ارائه شده‌اند [۲۲]:

جدول ۱- مقادیر پارامترها و ثابت‌های استفاده شده برای مدل‌سازی تک سلول SOFC [۱۹]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۰۰ cm <sup>۲</sup>	A		پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی سلول
۰/۰۵ cm	L <sub>۱</sub>	۱۴×۱۰ <sup>-۶</sup> m	D <sub>W,3</sub>
۰/۱ cm	L <sub>۲</sub>	۱۴×۱۰ <sup>-۶</sup> m	D <sub>W,5</sub>
۰/۰۵ cm	L <sub>۳</sub>	۱۴۰×۱۰ <sup>۳</sup> Jmol <sup>-۱</sup>	E <sub>۳</sub>
۰/۰۰۲ cm	L <sub>۴</sub>	۱۳۷×۱۰ <sup>۳</sup> Jmol <sup>-۱</sup>	E <sub>۵</sub>
۰/۰۰۵ cm	L <sub>۵</sub>	۱۰	n <sub>ch</sub>
۰/۱ cm	L <sub>۶</sub>	۰/۵	α
۰/۲ cm	L <sub>ch</sub>	۶/۵۴×۱۰ <sup>۱۱</sup> Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۲</sup>	δ <sub>۳</sub>
۰/۸ cm	L <sub>t</sub>	۲/۳۵×۱۰ <sup>۱۱</sup> Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۲</sup>	δ <sub>۵</sub>
۱۰ cm	L <sub>y</sub>	۱۶/۳ cm <sup>۲</sup>	V <sub>o<sub>2</sub></sub>
۱۰ cm	L <sub>z</sub>	۶/۱۲ cm <sup>۲</sup>	V <sub>H<sub>2</sub></sub>
۱۰ <sup>-۴</sup> ×۳/۷۵	L <sub>3,opt</sub>	۱۳/۱ cm <sup>۲</sup>	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>
۱۰ <sup>-۴</sup> ×۷/۲۰	L <sub>5,opt</sub>	۱۸/۵ cm <sup>۲</sup>	V <sub>N<sub>2</sub></sub>
	پارامترهای ثابت	۱/۵×۱۰ <sup>۶</sup> Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۱</sup>	σ <sub>۱</sub>
۰/۱ MPa	P <sub>f</sub> = P <sub>air</sub>	۸/۰×۱۰ <sup>۴</sup> Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۱</sup>	σ <sub>۳</sub>
۰/۱ MPa	P <sub>ref</sub>	۳۳/۴×۱۰ <sup>۴</sup> exp(-۱۰/۳×۱۰ <sup>۴</sup> /T) Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۱</sup>	σ <sub>۴</sub>
۱۰۷۳°K	T	۸/۴×۱۰ <sup>۴</sup> Ω <sup>-۱</sup> m <sup>-۱</sup>	σ <sub>۵</sub>
	ثابت‌های جهانی	۹/۵	Ψ <sub>۳</sub>
۹۶۵۰۰ C mol <sup>-۱</sup>	F	۷/۲	Ψ <sub>۵</sub>
۸/۳۱۴ J mol <sup>-۱</sup> K <sup>-۱</sup>	R		پارامترهای مربوط به طراحی هندسی

توان کلی که توسط ۱۰ استک SOFC تولید می‌شود برابر است با:

۱۰۰۰ می‌باشد.

بازدهی الکتریکی برای این ساختار به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{total} = V \times i \times N \times A \quad (32)$$

$$Eff = \frac{V \times i \times N \times A}{n_{H_2} \times LHV_f} \quad (33)$$

که N تعداد کل سلول‌های استک‌ها است که در اینجا معادل

## ۲-۲ مدل هزینه

طول عمر خدماتی دستگاه و با فرض نرخ تنزیل ۸٪ بنا شده است. همچنین قیمت تعمیرات و نگه داری سالانه سیستم برابر ۳٪ قیمت سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده است. قیمت سرمایه‌گذاری به صورت قیمت سالانه محاسبه می‌شود تا بتوان بر اساس آن قیمت نهایی و همتراز شده قیمت برق سیستم را در مدت طول عمر خدماتی آن محاسبه کرد.

$$Cost_{invest} = C_{fc} \times \frac{r(r+1)^n}{(r+1)^n - 1} \quad (40)$$

$$Cost_{fuel} = \frac{C_f}{Efficiency} \quad (41)$$

$$Cost = Cost_{invest} + Cost_{fuel} \quad (42)$$

## ۳-۳ بهینه‌سازی چند هدفه

بر خلاف بهینه‌سازی تک هدفه، بهینه‌سازی چند هدفه فراتر از مفهوم یک تعریف می‌باشد. در مورد بهینه‌سازی چندین تابع، به طور خاص هیچ جواب بهینه‌ی عمومی وجود ندارد و اغلب تعیین مجموعه‌ای از نقاط که هر کدام متناسب با یک جواب بهینه هستند، الزامی می‌باشد. مفهوم غالب بودن توابع در تعیین نقطه بهینه، همان نقاط و یا نمودار پارتو<sup>۱</sup> می‌باشد که تعاریف آن در چندین مقاله منتشر شده است [۲۴].

یکی از روش‌های عمومی و رایج برای بهینه‌سازی چند هدفه، روش وزن دهی عمومی می‌باشد که در این روش تمام توابع هدف به صورت یک تابع هدف به هم متصل می‌شوند. اگرچه یک ضابطه عمومی برای تعیین ضرایب وزن دهی وجود ندارد اما در روش وزن دهی می‌توان با انتخاب ضرایب مناسب و دلخواه، ترجیحات توابع هدف را در بهینه‌سازی اعمال کرد و یا از یک مدل ریاضی برای تعیین این ضرایب بهره برد. یکی از توابع مفید عمومی برای جمع توابع هدف به صورت زیر می‌باشد:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i [F_i(x)]^p, F_i(x) > 0 \forall i \quad (43)$$

1. Pareto

برای محاسبه قیمت سرمایه‌گذاری سیستم از مدل هزینه‌ای که توسط پلازی و همکارانش [۱۷] ارائه شده است، استفاده خواهد شد. تعداد کل سلول‌ها به صورت تعداد استک‌هایی که هر کدام شامل ۱۰۰ سلول می‌باشد، تعریف می‌شود. قیمت سرمایه‌گذاری شامل قیمت اتاقک برای هر ۱۰۰ سلول و همچنین قیمت محفظه تحت فشار می‌باشد. پارامترها و ثابت‌هایی که برای مدل قیمت سرمایه‌گذاری استفاده می‌شود، در جدول (۲) آورده شده است.

$$C_{cell} = A_{cell} C_{spec} \quad (34)$$

$$N_{stack} = \frac{N_{cells}}{N_{cells}^{max}} \quad (35)$$

$$C_{VBM} = C_{VP} \cdot f_{BM} \cdot f_{pressure} \quad (36)$$

$$C_{VP} = 10^{K_1 + K_2 \log(ThermalLoad)} \quad (37)$$

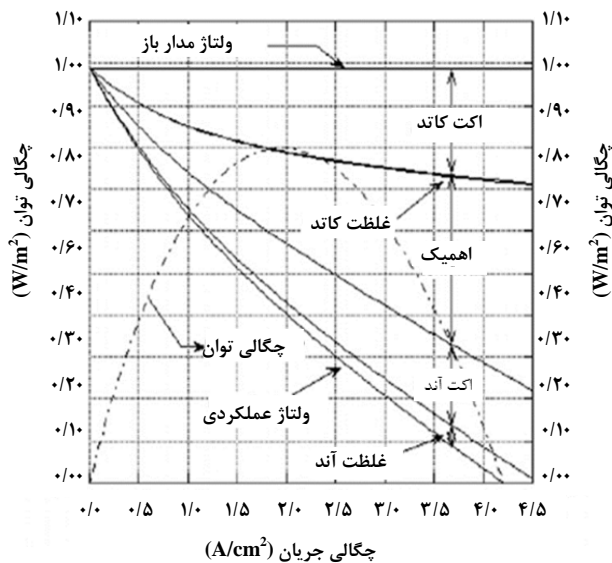
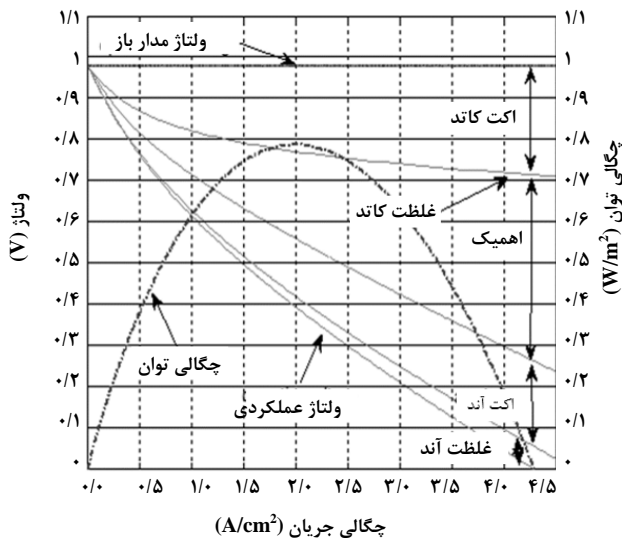
$$C_{FCstack} = f_{BM} \cdot (C_{cell} \cdot N_{cells} + 2 \cdot N_{stack} \cdot A_{cell} \cdot f_{hs} \cdot C_{h,spec}) \quad (38)$$

$$C_{fc} = f_{actualization} \cdot (C_{VBM} + C_{FCstack}) \quad (39)$$

جدول ۲- ثابت‌های مدل قیمت

واحد	مقدار	پارامتر
(\$/cm <sup>2</sup> )	۰/۱۴۴۲	C <sub>spec</sub>
(\$/cm <sup>2</sup> )	۰/۳۰۹۵	C <sub>h,spec</sub>
	۲/۵۶۸۹	K <sub>1</sub>
	۰/۸۰۶۷	K <sub>2</sub>

مدل فنی اقتصادی همچنین شامل قیمت هیدروژن (۰/۱۱۹ \$/kWh) می‌باشد که در اینجا فرض می‌شود از رفرمینگ گاز طبیعی حاصل شده است [۲۵]. آنالیز قیمت بر اساس ۱۳ سال



شکل ۲- مقایسه نمودارهای قطبش و چگالی توان

بدست آمده در کار حاضر (بالا) و نمودار

بدست آمده در مقاله مرجع [۱۹] (پایین)

در مقاله حاضر دو بهینه‌سازی چند هدفه بر روی مدلی که در بالا توصیف شد انجام شده است. متغیر تصمیم‌گیری در این بهینه‌سازی‌ها چگالی جریان است که یکی از پارامترهای مهم عملکردی سیستم می‌باشد، در نظر گرفته شده است. سیستم مورد نظر شامل ۱۰ استک SOFC می‌باشد که هر استک خود شامل ۱۰۰ سلول خواهد بود. در هر کدام از بهینه‌سازی‌های چند هدفه، دو تابع هدف متضاد با یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند. ابتدا کمینه‌سازی قیمت همتراز شده برق تولیدی و بیشینه‌سازی توان سیستم (معادله ۴۷) و سپس کمینه‌سازی قیمت همتراز شده برق تولیدی و

که  $k$  تعداد توابع هدف و  $w_i$  ضرایب وزن دهی می‌باشد که این ضرایب باید از رابطه زیر پیروی کند.

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (44)$$

در معادله بالا  $w$  و  $p$  به طور مشخص و یکتا تعریف نمی‌شوند. اغلب مقدار نوعی  $1$  برای  $p$  در نظر گرفته می‌شود سپس کاربر مقادیر مختلف را به صورت متناوب برای نشان دادن ترجیحات توابع، به  $w$  نسبت می‌دهد تا مجموعه‌ای از نقاط بهینه پارتو بدست آید.

به علت اینکه ابعاد و مقادیر توابع هدف با یکدیگر متفاوت می‌باشند، تبدیل توابع هدف به توابع بی بعد یک راه حل مفید خواهد بود. یکی از روش‌های تبدیل توابع به صورت زیر است:

$$F_i^{trans} = \frac{F_i(x)}{F_i^{max}} \quad (45)$$

رابطه بالا تابع هدف بی بعدی را نتیجه می‌دهد که مقدار آن کمتر از ۱ خواهد بود. روش‌های تعیین  $F_i^{max}$  توسط مارلر و همکارانش [۲۴] بیان شده است.

در این مقاله معادلات بهینه‌سازی چند هدفه به صورت زیر در نظر گرفته شده است که در هر کدام از معادلات، بهینه‌سازی بر اساس دو تابع هدف صورت گرفته است:

$$MINZ = W \times Cost - (1-W) \times P_{total} \quad (46)$$

$$MINZ = W \times Cost - (1-W) \times Eff \quad (47)$$

#### ۴- نتایج و بحث

در تلاش برای اعتبار سنجی مدل، نمودار قطبش که توسط مدل حاضر شبیه‌سازی شده، با نمودار قطبش بدست آمده از کارون و همکارانش [۱۹] مقایسه شده است. شکل (۲) نتیجه این مقایسه را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است تحت شرایط یکسان ( $1073^\circ C$ )، شکل کلی دو نمودار و همچنین فاصله نسبی میان انواع افت‌های پتانسیل قابل تطبیق با یکدیگر هستند.



بیشینه‌سازی بازدهی الکتریکی سیستم (معادله ۴۸). قید مربوط به این بهینه‌سازی‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$0 \leq i \leq 4.5 \quad (48)$$

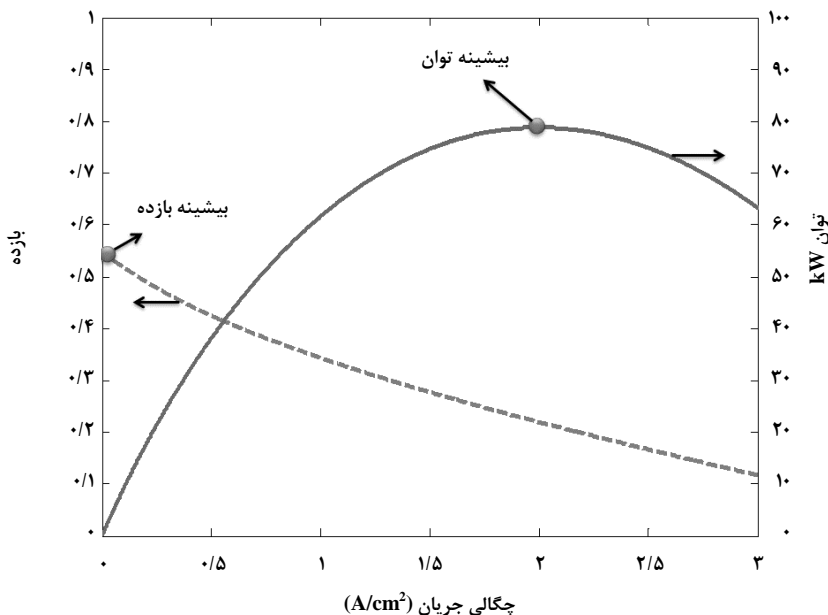
همانطور که شکل (۳) نشان می‌دهد در ابتدا با افزایش چگالی جریان، توان سیستم افزایش می‌یابد و قیمت سرمایه‌گذاری به ازای هر واحد توان کاهش می‌یابد ولی به صورت همزمان با افزایش چگالی جریان، بازدهی سیستم کاهش می‌یابد و قیمت سوخت افزایش می‌یابد. در نتیجه چگالی جریان به عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری، امکان جابجایی بین توابع هدف را برای ما فراهم می‌آورد.

در مقاله حاضر از الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی، برای بهینه‌سازی معادلات ۴۷ و ۴۸ استفاده شده است. در این راستا، تعداد دفعات تکرار الگوریتم برابر ۱۰۰ و همچنین ضریب مهاجرت برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

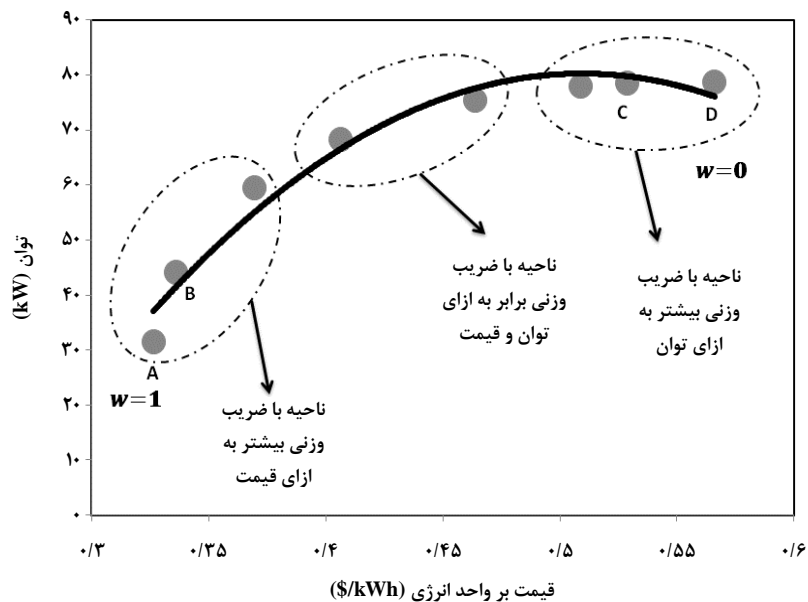
نمودار پارتو در شکل (۴) نتایج بهینه‌سازی، که همان نقاط بهینه در فضای توابع هدف می‌باشد را نمایش می‌دهد. در این کار از هیدروژن تولید شده از فرمینگ گاز طبیعی استفاده شده است که قیمت آن ۰/۱۱۹ (\$/kWh) می‌باشد. در این نمودار، نقطه A معادل

کمینه قیمت برق تولیدی (۰/۳۲ (\$/kWh) به ازای توان ۳۱/۵۴ kW می‌باشد و ضریب وزن دهی در این نقطه برابر ۱ می‌باشد. با کاهش ضریب وزن دهی و افزایش اهمیت مقدار توان خروجی، توان بیشتری می‌توان از سیستم استحصال کرد اما این عمل باعث افزایش قیمت برق تولیدی خواهد شد. در نقطه D که ضریب وزن دهی به صفر رسیده است، بیشینه توان ۷۸/۸ kW به ازای قیمت برق ۰/۵۶ (\$/kWh) استحصال می‌شود.

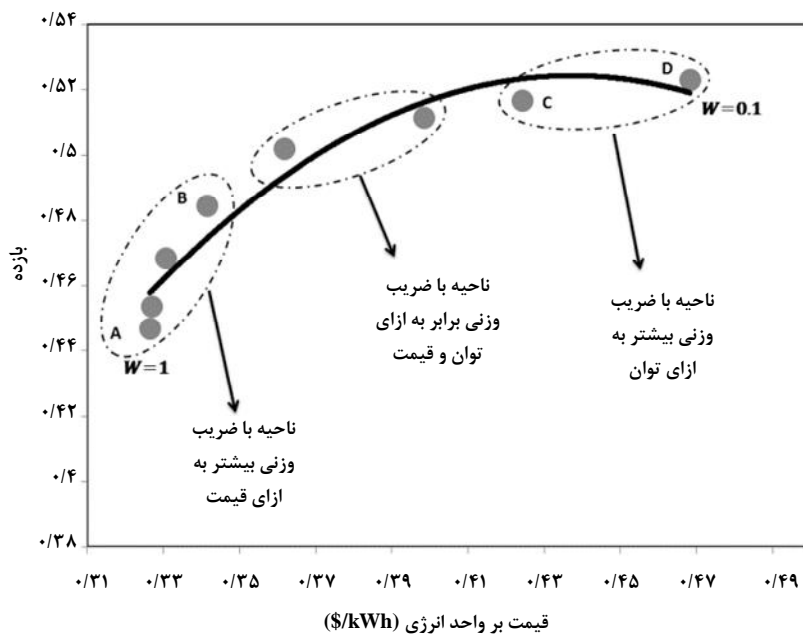
این نتایج می‌تواند به عنوان اولین راهنما برای انتخاب نقطه عملکردی مناسب، توسط تصمیم‌گیرنده مورد استفاده قرار گیرد. با در نظر داشتن مقدار خاصی برای قیمت برق تولیدی، می‌توان بیشینه توان را به ازای این قیمت بدست آورد. همچنین وقتی افزایش قیمت برق بر روی افزایش توان تأثیر زیادی داشته باشد، ممکن است تصمیم‌گیرنده حاضر به پرداخت قیمت بیشتری شود که این بیان معادل با ناحیه اول در شکل (۵) می‌باشد. در این ناحیه افزایش ۲/۹ درصدی در قیمت برق بین نقاط A و B، منجر به افزایش ۴۰ درصدی در توان سیستم خواهد شد. از سویی دیگر در ناحیه سوم در شکل (۵)، افزایش قیمت برق از مطلوبیت کمتری برخوردار خواهد بود. در این ناحیه بین نقاط C و D، افزایش ۴۰ درصدی در قیمت انرژی منجر به افزایش تنها ۰/۵ درصد در توان سیستم خواهد بود.



شکل ۳- نمودارهای بازدهی و توان بر حسب چگالی جریان



شکل ۴- نمودار توان بر حسب قیمت واحد انرژی



شکل ۵- نمودار بازدهی الکتریکی بر حسب قیمت واحد انرژی

به کمینه کردن قیمت برق و بدون در نظر گرفتن میزان بازدهی الکتریکی می‌باشد. در ناحیه اول این نمودار، نقطه A که بر اساس ضریب وزنی ۱ بدست آمده است، معادل کمینه قیمت انرژی ( $\$/kWh$ ) ۰/۳۲ به ازای بازدهی ۰/۴۴ می‌باشد. با کاهش ضریب وزن دهی و افزایش اهمیت بازدهی الکتریکی، جواب‌های بهینه‌ای با قیمت‌های برق بیشتر بدست می‌آیند. نقطه D در ناحیه سوم به ازای

هنگامی که مصرف سوخت و قیمت ناشی از آن دارای اهمیت باشد و مصرف کننده تمایل به افزایش بازدهی سیستم داشته باشد، نمودار شکل (۵) می‌تواند نقاط بهینه مورد نیاز را در اختیار قرار دهد. این نمودار نقاط بهینه‌ای را که بر اساس بهینگی دو تابع هدف بازدهی الکتریکی و قیمت برق بدست آمده است را نمایش می‌دهد. در نظر گرفتن ضریب وزنی ۱ معادل بهینه‌سازی سازی سیستم تنها با توجه

صورت نسبت سوخت مصرف شده در واکنش‌ها به سوخت فراهم شده توسط کانال تعریف می‌شود. واضح است هرچه این ضریب بالاتر باشد سوخت کمتری از انتهای کانال خارج می‌شود و در مصرف سوخت صرفه‌جویی می‌شود.

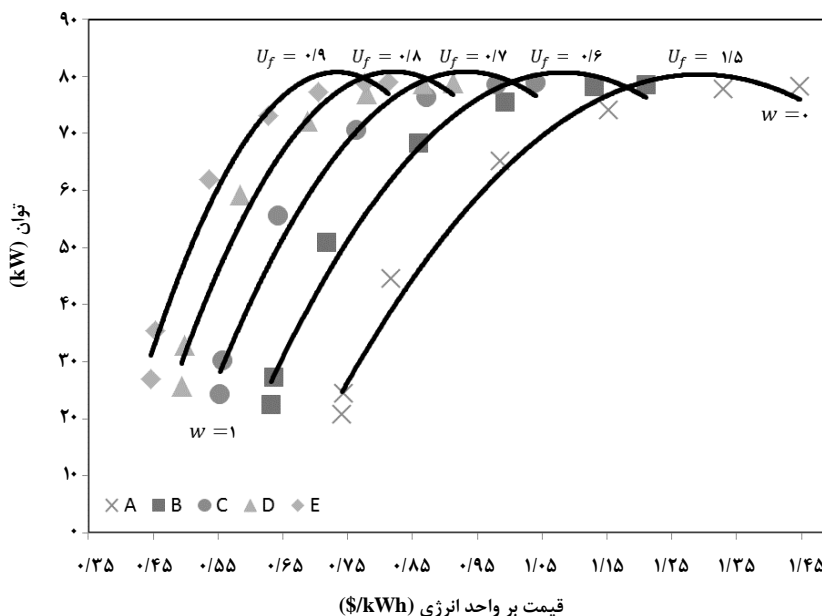
در شکل‌های (۶) و (۷)، نمودارهای پارتو به ترتیب برای توابع هدف (توان- قیمت برق) و همچنین (بازدهی- قیمت برق) در قالب ۵ گروه A و B و C و D و E به ازای مقادیر مختلف ضریب مصرف سوخت رسم شده است. در هر گروه از این نمودارها به علت تفاوت در ضریب مصرف سوخت، مقادیر قیمت، توان و بازدهی الکتریکی نیز متفاوت خواهد بود.

در شکل (۶) توابع هدف به صورت بیشینه‌سازی توان خروجی و کمینه‌سازی قیمت برق می‌باشد. در این شکل جواب‌های بهینه گروه A که به ازای کمترین مقدار  $\gamma_f$  بدست آمده‌اند، به علت مصرف بالای هیدروژن در تولید واحد برق، بیشترین بازه قیمتی را از  $0.74$  (\$/kWh) برای توان  $20.74$  kW تا قیمت  $1.44$  (\$/kWh) برای توان  $78.15$  kW شامل می‌شود. با افزایش ضریب مصرف سوخت و حرکت به سمت نمودارهای سمت چپ، میزان مصرف هیدروژن و در نتیجه قیمت برق به ازای تولید توان مشخص، کاهش می‌یابد. جواب‌های بهینه در گروه E که به ازای بیشترین مقدار  $\gamma_f$

ضریب وزن دهی ۰ بدست آمده است و این نقطه معادل بیشینه بازدهی  $0.52$  برای قیمت برق  $0.46$  (\$/kWh) می‌باشد. وقتی افزایش قیمت انرژی تأثیر زیادی بر روی افزایش بازدهی داشته باشد ممکن است تصمیم گیرنده تمایل به پرداخت قیمت بیشتری برای برق داشته باشد. این بیان در ناحیه اول نمودار شکل (۵) اتفاق می‌افتد که در این ناحیه افزایش ۴ درصدی در قیمت انرژی بین نقاط A و B منجر به افزایش  $8/5$  درصدی در بازدهی خواهد شد. در ناحیه سوم همین شکل، افزایش قیمت برای مصرف کننده مطلوبیت ندارد به گونه‌ای که افزایش ۱۰ درصدی در قیمت انرژی بین نقاط C و D، منجر به افزایش تنها ۱ درصد در بازدهی الکتریکی سیستم خواهد شد.

## ۵- تحلیل حساسیت

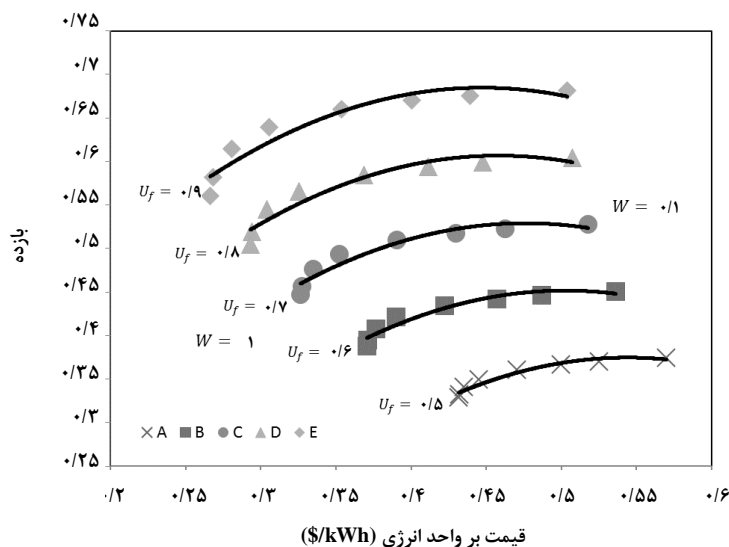
در پیل‌های سوختی برای اطمینان از تولید توان مورد نظر، همواره سوخت بیشتری نسبت به عدد استوکیومتری وارد کانال سوخت می‌کنند؛ زیرا تمامی سوخت (هیدروژن) وارد شده به الکتروود نفوذ نمی‌کند و همه آن وارد واکنش‌های الکتروشیمیایی نمی‌شود و مقداری از آن از انتهای کانال خارج می‌شود. برای بیان این موضوع از کمیت ضریب مصرف سوخت ( $\gamma_f \leq 1$ ) استفاده می‌شود که به



شکل ۶- نمودار توان بر حسب قیمت برای مقادیر متفاوت  $\gamma_f$

در شکل (۷) نمودارهای پارتو به ازای توابع بازدهی الکتریکی و قیمت برق برای ضرایب مصرف سوخت مختلف رسم شده‌اند. جواب‌های بهینه به ازای کمترین  $\gamma_f$  در گروه A قرار گرفته‌اند که بالاترین بازدهی قیمتی و در عین حال کمترین بازده الکتریکی مربوط به این گروه می‌باشد. در این گروه قیمت از  $0/43$  (\$/kWh) برای بازدهی  $0/37$  تغییر می‌کند. با افزایش ضریب مصرف سوخت میزان مصرف هیدروژن و در نتیجه قیمت برق کاهش می‌یابد و در عین حال بازدهی الکتریکی افزایش خواهد یافت. به ازای بیشترین  $\gamma_f$  که مربوط به جواب‌های بهینه گروه E می‌باشد کمترین مقدار قیمت برق و در عین حال بیشترین مقدار بازدهی الکتریکی بدست خواهد آمد. در این گروه، قیمت از  $0/26$  (\$/kWh) برای بازدهی  $0/56$  تا  $0/5$  (\$/kWh) برای بازدهی  $0/68$  تغییر می‌کند. با حرکت از نمودار گروه A به سمت گروه E در نقطه  $w=1$  که تنها کاهش قیمت برق مورد توجه می‌باشد، کمینه مقدار قیمت برق  $62$  درصد کاهش و در عین حال بازدهی الکتریکی  $82$  درصد افزایش می‌یابد. همانطور که از نتایج مشخص است افزایش ضریب مصرف سوخت بر روی افزایش بازدهی الکتریکی تأثیر بیشتری نسبت به افزایش توان خواهد داشت. در این قسمت نیز در حالت کلی در صورت امکان کار کردن با ضریب مصرف سوخت بالاتر، هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ فنی عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد.

بدست آمده‌اند، کمترین بازه قیمتی را شامل می‌شود که این جواب‌ها از قیمت  $0/44$  (\$/kWh) برای توان  $27/02$  kW تا قیمت  $0/81$  (\$/kWh) برای توان  $78/9$  kW تغییر می‌کند. در نقطه  $w=1$  با حرکت از نمودار A به سمت نمودار E، قیمت برق تولیدی  $68$  درصد کاهش می‌یابد و در عین حال میزان توان خروجی  $30$  درصد افزایش می‌یابد. در ابتدای نمودار A (حوالی  $w=1$ ) که کاهش قیمت برق بیشتر مورد توجه می‌باشد، با افزایش  $10$  درصدی در میزان قیمت برق، توان تولیدی  $23/74$  درصد افزایش می‌یابد. در صورتی که در گروه E در همین ناحیه با افزایش تنها  $1/4$  درصد در قیمت برق می‌توان توان تولیدی را تا  $30$  درصد افزایش داد. همچنین در قسمت بالای نمودار A (حوالی  $w=0$ ) که تولید بیشتر توان مورد نظر می‌باشد، افزایش  $25$  درصد در قیمت برق افزایش  $5/5$  درصدی را در توان خروجی به دنبال خواهد داشت در صورتی که در نمودار E در همین ناحیه با افزایش  $30$  درصد در قیمت برق توان خروجی  $8$  درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که اگر تصمیم گیرنده بخواهد توان تولیدی خود را افزایش دهد در حالی که سیستم در چگالی جریان پایین (توان پایین) کار می‌کند بهتر است ضریب مصرف سوخت را افزایش دهد اما اگر سیستم در توان بالا کار می‌کند تفاوت زیادی در این زمینه وجود نخواهد داشت. به طور کلی اگر محدودیتی بر سر راه افزایش ضریب مصرف سوخت وجود نداشته باشد، افزایش این کمیت منجر به عملکرد بهتر سیستم و همچنین کاهش قیمت برق تولیدی خواهد شد.



شکل ۷- نمودار بازدهی بر حسب قیمت برای مقادیر متفاوت  $\gamma_f$

## ۶- نتیجه گیری

نشان می‌دهند ضریب مصرف سوخت یکی از پارامترهای مهم در تعیین هزینه نهایی سیستم پیل سوختی اکسید جامد می‌باشد. در حالت کلی و بدون توجه به محدودیت‌های ممکن، کار کردن در ضریب مصرف سوخت بالاتر هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ فنی، عملکرد سیستم را تقویت می‌بخشد. به هر حال با افزایش ضریب مصرف سوخت، توان خروجی سیستم و همچنین بازدهی الکتریکی سیستم به مقدار بیشینه خود نزدیکتر می‌شوند.

## فهرست علائم

$A$	مساحت، $m^2$
$A_{opt}$	مساحت ناحیه فعال، $m^2$
$C_{cell}$	قیمت هر سلول، \$
$Ch, spec$	قیمت مخصوص اتاقل استک، $(\$/cm^2)$
$C_f$	قیمت سوخت، $(\$/kwh)$
$C_{FC, spec}$	قیمت واحد سطح سلول، $(\$/cm^2)$
$C_{FC, stack}$	قیمت پیل سوختی، \$
$C_{invest}$	قیمت سرمایه گذاری، $(\$/kwh)$
$C_{VBM}$	قیمت اتاقل حجمی خالی، \$
$D$	نفوذ جرمی، $(m^2/s)$
$D_w$	عرض یک شیار، m
$E$	انرژی فعالساز، $J mol^{-1}$
$F$	ثابت فارادی، $C mol^{-1}$
$F(x)$	تابع هدف
$F^{trans}$	تابع هدف بی بعد
$i$	چگالی جریان، $(A/cm^2)$
$i_0$	چگالی جریان تبدالی، $(A/cm^2)$
$L$	طول، m
$L_{opt}$	ضخامت ناحیه فعال، m
$LHV$	ارزش حرارتی هیدروژن، $(J/mol)$
$M$	وزن مولکولی $(Kg/mol)$
$n$	تعداد الکترون به ازای هر واکنش دهنده
$n_{in}$	دبی مولی جریان ورودی $(mol/s)$
$n_{out}$	دبی مولی جریان خروجی $(mol/s)$
$n_{ch}$	تعداد کانال‌ها
$P$	فشار Pa
$P_{elec, cell}$	توان الکتریکی هر سلول kW

در این مقاله یک مدل فنی اقتصادی برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید توان SOFC ارائه شده است. روش بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهینه‌سازی سیستم، مورد استفاده قرار گرفته است و در این راستا از ابزار بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک بهره برده شده است. روش بهینه‌سازی چند هدفه امکان ایجاد نمودارهای پارتو را فراهم می‌آورد که می‌توان با استفاده از این نمودارها، جابجایی مطلوب را میان توابع هدف متضاد مانند (توان- قیمت برق) و یا (بازده- قیمت برق) داشت. نتایج بهینه‌سازی چند هدفه زمینه مناسبی را برای تصمیم گیرنده فراهم می‌آورد تا بتواند بهترین نقطه عملکردی (چگالی جریان) را با توجه به معیارهایی مانند قیمت انرژی، توان، بازدهی و یا طول عمر سیستم بدست آورد. همچنین تحلیل نظام مند نتایج این نوع بهینه‌سازی، درک عمیقی از تأثیر چگالی جریان بر روی عملکرد و قیمت سیستم فراهم می‌آورد.

در این مقاله بهینه‌سازی چند هدفه با در نظر گرفتن دو مجموعه از توابع هدف انجام شده است. در مجموعه اول کمینه کردن قیمت همتراز شده برق  $(\$/kWh)$  و بیشینه کردن توان خروجی از سیستم مورد نظر می‌باشد. همچنین در مجموعه دوم، کمینه کردن قیمت همتراز شده برق  $(\$/kWh)$  و بیشینه کردن بازدهی الکتریکی سیستم به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی مسأله اول بیشینه توان خروجی  $78/7 kW$  را در قیمت همتراز شده برق  $(\$/kWh) 0/56$  و همینطور کمینه قیمت برق  $(\$/kWh) 0/32$  را در توان خروجی  $31/5 kW$  پیش بینی کرده است. در مسأله دوم نیز، بیشینه بازدهی الکتریکی  $52/3\%$  به ازای قیمت برق  $(\$/kWh) 0/46$  بدست آمده است، در حالی که این مسأله کمینه قیمت برق  $(\$/kWh) 0/32$  را برای بازدهی الکتریکی  $44/6\%$  پیش بینی کرده است. همچنین نمودارهای پارتو نشان می‌دهند که در ابتدا با افزایش قیمت انرژی، توان و بازدهی الکتریکی به سرعت افزایش می‌یابد؛ اما به ازای قیمت‌های بالاتر انرژی، توان و بازدهی به کندی افزایش می‌یابد. در نتیجه اگر سیستم در شرایط کارکردی تولید توان پایین قرار داشته باشد افزایش قیمت برق برای افزایش تولید توان و بازدهی الکتریکی کاملاً به صرفه خواهد بود.

در انتها، تحلیل حساسیت بر روی نتایج هر دو مسأله بهینه‌سازی به ازای مقادیر مختلف ضرایب مصرف سوخت انجام شده است. نتایج

$ohm$  اهمی  
 $out$  خروجی  
 $TPB$  ناحیه سه گانه

$P_{total}$  توان کلی سیستم kW  
 $r$  نرخ تنزیل  
 $T$  دما K  
 $V$  ولتاژ V  
 $W$  ضریب وزن دهی

**مراجع**

[1] Singhal, S. C., Kendall, K. "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications", Elsevier Advanced Technology, Oxford, UK, (2003).

[2] Gardner, F. J., Day, M. J., Brandon, N. P., Pashley, M. N., Cassidy, M. "SOFC technology development at Rolls-Royce", Journal of Power Sources 86, 122–129; (2000).

[3] Winkler, W., Lorenz, H. "Design studies of mobile applications with SOFC-heat engine modules", Journal of Power Sources 106, 338–343; (2002).

[4] Sorrentino, M., Mandourah, A., Petersen, T. F., Guezennec, Y. G., Moran, M. J., Rizzoni, G. "1-D Planar Solid oxide Fuel cell Model for Simulation of SOFC-based Energy systems". Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA, November 13–20, (2004).

[5] Janardhanan, V. M., Heuveline, V., Deutschmann, O. "Three-phase boundary length in solid-oxide fuel cells: A mathematical model." J. Power Sources 178, 368–372; (2008).

[6] Akkaya, A. V. "Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC". Int J Energy Res 31, 79–98; (2007).

[7] Bessette, I. I., Wepfer, N. F., Winnick, W. J. "A mathematical model of a solid oxide fuel cell". Journal of the Electrochemical Society, 142(11), 3792–3800; (1995).

[8] Costamagna, P., Honegger, K. "Modeling of solid oxide heat exchanger integrated stacks and simulation at high fuel utilization". Journal of the Electrochemical Society, 145(11), 3995–4007; (1998).

[9] Bove, R., Ubertini, S. "Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, Techniques and results". J. Power Sources 159, 543–559; (2006).

[10] Recknagle, K. P., Williford, R. E. Chick, L. A., Rector, D. R., Khaleel, M. A. "Three-Dimensional Thermo-Fluid-Electrochemical Modeling of Planar SOFC Stacks". J. Power Sources 113, 109–114; (2003).

[11] Khaleel, M. A., Lin, Z., Singh, P., Surdoval, W., Collins, D. "A finite element analysis modeling tool for solid oxide fuel cell development: coupled electrochemist". J. Power Sources 130, 136–148; (2004).

[12] Deseure, J., Bultel, Y., Dessemond, L., Siebert, E. "Theoretical optimization of a SOFC composite cathode". Electro chemical Acta, 50, 2037–2046; (2005).

[13] Ji, Y., Yuan, K., Chung, J., Yen-Cho, C. "Effects of transport scale on heat/mass transfer and performance optimization for solid oxide fuel cells". Journal of Power Sources 161, 380–391; (2006).

$X$  کسر مولی مولفه در ترکیب  
 علائم یونانی  
 $\alpha$  ضریب انتقال بار  
 $\beta$  مقاومت اهمی،  $\Omega$   
 $\delta$  ضریب قبل از exp،  $(\Omega^{-1} m^{-2})$   
 $\phi$  تخلخل  
 $\gamma_f$  ضریب مصرف سوخت  
 $\eta$  افت ولتاژ، V  
 $\lambda_{air}$  نسبت استوکیومتری هوا  
 $v$  حجم نفوذ مولکول ساده، cm<sup>3</sup>  
 $\sigma$  هدایت الکتریکی،  $(\Omega^{-1} m^{-1})$   
 $\psi$  انحنا

زیرنویس‌ها و بالا نویس‌ها

1 صفحه دو قطبی  
 2 کانال سوخت  
 3 آند  
 4 الکترولیت  
 5 کاتد  
 6 کانال هوا  
 $a$  آند  
 $act$  فعالسازی  
 $active$  فعال  
 $c$  کاتد  
 $ch$  کانال  
 $diff$  غلظت  
 $f$  سوخت  
 $i$  شماره توابع هدف  
 $in$  ورودی  
 $ocv$  ولتاژ مدار باز

- [14] Denver Cheddie, F. "Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant". *International journal of hydrogen energy* 36, 1702-1709; (2011).
- [15] Calise, F., Accadia, M. D. D., Vanoli, L., Spakovsky, M. V. "Single-level optimization of a hybrid SOFC-GT power plant". *Journal of Power Sources* 159, 1169–1185; (2006). Baratto, F., Diwekar, U. M. "Multi-objective trade-offs for fuel cell based auxiliary power units: Case study of south California air basin". *Journal of Power Sources* 139, 197–204; (2005).
- [16] Palazzi, F., Autissier, N., Marechal, F. M. A., Favrat, D. "A methodology for thermo-economic modeling and optimization of solid oxide fuel cell systems". *J. Thermal Engineering* 27, 2703–2712; (2007).
- [17] Autissier, N., Palazzi, F., Marechal, F., Van Herle, J., Favrat, D. "Thermo-Economic Optimization of a Solid Oxide Fuel Cell, Gas Turbine Hybrid System". *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 4, 123-129; (2007).
- [18] Wen, H., Ordonez, J. C., Vargas, J. V. C. "Single solid oxide fuel cell modeling and optimization". *Journal of Power Sources* 196, 7519– 7532; (2011).
- [19] Kim, J. W., Virkar, A. V., Fung, K. Z., Mehta, K., Singhal, S. C. J. "Polarization Effect in Intermediate Temperature, Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cell". *Journal of Electrochem. Soc.* 146(1), 69–78; (1999).
- [20] Aguiar, P., Adjiman, C. S., Brandon, N. P. "High Efficiency Process for the Production of Pure Oxygen Based on solid oxide fuel cell-solid oxide electrolyzer technology" *J. Power Sources* 138, 120136; (2004).
- [21] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Poling, B. E. "The Properties of Gases and Liquids". 4th ed., McGraw Hill, New York, (1988).
- [22] Bard, A. J., Faulkner, L. R. "Electrochemical Methods-Fundamentals and Applications". 2nd ed., Wiley, New York, (2001).
- [23] Marler, R. T, Arora, J. S. "Survey of multi-objective optimization methods for engineering". *Struct Multidisc Optim* 26, 369–395 (2004).
- [24] Yao, F., Jia, Y., Mao, Z. "The cost analysis of hydrogen life cycle in China". *International journal of hydrogen energy* 35, 2727–2731; (2010).