

## مدل سازی الکتروشیمیایی و اقتصادی توده پیل سوختی اکسید جامد لوله ای در یک سیستم تولید انرژی

جاماسب پیرکنندی<sup>1\*</sup>، مجید قاسمی<sup>2</sup>

<sup>1</sup> استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

Jamasb\_p@yahoo.com

<sup>2</sup> استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

ghasemi@kntu.ac.ir

دریافت مقاله: 91/2/5 اصلاحیه: 91/9/18

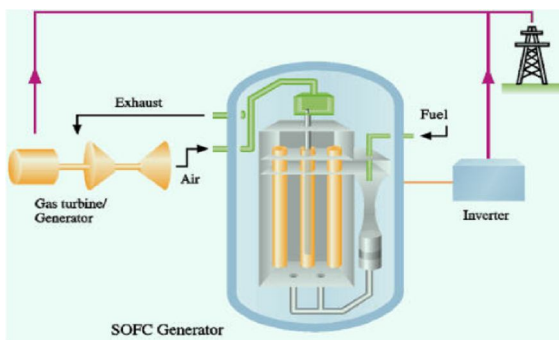
پذیرش مقاله: 92/2/12

**چکیده:** هدف از این مقاله، مدل سازی الکتروشیمیایی و اقتصادی توده یک پیل سوختی اکسید جامد لوله ای می باشد. برای انجام این تحقیق، ابتدا یک مدل الکتروشیمیایی کامل برای تک سل پیل سوختی ارائه شده و سپس افت های مربوط به فعال سازی، اهمی و غلظتی آن به دست آورده شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش دما و فشار کاری پیل، افت ولتاژ کلی کمتر شده و عملکرد آن بهبود می یابد. از سوی دیگر، افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش راندمان الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی در آن می شود، این در حالی است که افزایش فشار کاری پیل تأثیر زیادی بر راندمان الکتریکی آن نخواهد داشت. در این تحقیق، برای توده پیل سوختی اکسید جامد لوله ای در دمای کاری 1273 K، ضریب بهینه مصرف سوخت حدود 0/8 تا 0/85 و نسبت هوا به سوخت ورودی به آن برابر 8 به دست آمده است. نتایج تحلیل های اقتصادی نیز نشان می دهد که افزایش دمای کاری پیل، سبب بالا رفتن توان تولیدی در آن می گردد و این مسئله سبب کاهش قیمت برق تولیدی و همچنین سایر هزینه های مربوط به خرید، نصب و راه اندازی سیستم می شود. در دمای 1273 K قیمت برق تولیدی در حدود 14 سنت و هزینه یک مجموعه تولید توان با مولد پیل سوختی در حدود 1900 دلار بر کیلووات برآورد شده است.

**واژه های کلیدی:** پیل سوختی اکسید جامد لوله ای، مدل سازی الکتروشیمیایی، مدل اقتصادی لازارتو، راندمان.

راندمان 46 درصد برآورد شده بود [4]. با ساخت میکروتوربین‌های با توان‌های زیر 250 کیلووات و امکان ترکیب عملی آن‌ها با پیل‌های سوختی موجود، پژوهش‌های انجام شده در این زمینه شتاب بیشتری گرفتند. در ژانویه سال 2000، پژوهشگران دانشگاه کالیفرنیا، یک پیل سوختی اکسید جامد را که در فشار سه اتمسفر عمل می‌کرد، با یک میکروتوربین گاز با توان 50 کیلووات ترکیب کردند. در شکل (1) پیکره‌بندی سیستم هیبریدی پیشنهادی آن‌ها نشان داده شده است. این سیستم دارای توان اسمی 220 کیلووات بود که 170 کیلووات آن از پیل سوختی و 50 کیلووات آن از توربین گازی به دست آمده بود. راندمان سیستم فوق برابر 57 درصد محاسبه شده بود. سیستم اشاره شده برای اولین بار در مرکز تحقیقات ملی دانشگاه کالیفرنیا در ایرواین نصب و آزمایش شد [5].

از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه، می‌توان به فعالیت‌های چان و همکاران [6] در سال 2001 اشاره کرد. آن‌ها در این تحقیق، تحلیل کاملی از افت ولتاژهای درون پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای انجام دادند و حساسیت ولتاژ آن را نسبت به ضخامت اجزای پیل ارائه کردند. کستومگنا و همکاران [7] در سال 2004 نیز مدل‌سازی الکتروشیمیایی پیل سوختی اکسید جامد صفحه‌ای یک‌پارچه را به طور کامل انجام دادند و نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. زانگ و همکاران [8] در تحقیق دیگری، یک پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای را به صورت پارامتری و با استفاده از نرم‌افزار تجاری آسپن پلاس شبیه‌سازی کردند. الویی و همکاران [9] در سال 2007 به بررسی تحلیلی افت ولتاژهای درون یک پیل سوختی اکسید جامد پرداختند و سپس تأثیر نوع سوخت به کار رفته را در بهبود عملکرد الکتروشیمیایی آن بررسی کردند. از دیگر تحقیقات ارزشمند انجام شده در این زمینه، می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط کامپاناری [10]، لازاریتو و همکاران [11]، بارادواج و همکاران [12]، ولکان [13]، قاسمی و مولایی [14] و چانگ بو و همکاران [15] اشاره کرد.



شکل (1): پیکره‌بندی سیستم هیبریدی ارائه شده توسط شرکت زیمنس

وستینگهاوس در سال 2000 [5]

## 1. مقدمه

فن‌آوری پیل سوختی که در آن، هیدروژن طی یک سری واکنش‌های الکتروشیمیایی با اکسیژن، توان الکتریکی و حرارت تولید می‌کند، یکی از بهترین گزینه‌های تولید انرژی محسوب می‌شود. پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، عدم انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی، دانسیته توان بالا، عدم وجود قطعات متحرک و عدم ایجاد ارتعاش و صدا تجهیزات مطلوبی برای تولید انرژی به حساب می‌آیند. یکی از انواع مهم و پرکاربرد پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد است. دمای عملکرد بالای این نوع از پیل‌های سوختی سبب شده است تا در این نوع پیل‌ها بتوان سوخت‌های متنوعی نظیر گاز طبیعی را به طور مستقیم مورد استفاده قرار داد. علاوه بر این، گرمای تولید شده در این نوع از پیل‌های سوختی دارای کیفیت بالایی بوده و قابلیت استفاده در بیشتر سیستم‌های حرارتی را دارا می‌باشد [1]. محدوده کاری پیل‌های سوختی اکسید جامد در حدود 700 تا 1000 درجه سلسیوس است. به دلیل دمای عملیاتی بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد، امکان تولید سوخت مورد نیاز آن‌ها از هیدروکربن‌هایی مانند گاز طبیعی، در داخل پیل وجود داشته و این فرآیند تبدیل را به اصطلاح به‌سازی<sup>1</sup> می‌گویند. با توجه به ماهیت گرماگیر بودن واکنش به‌سازی و همچنین محل انجام این واکنش، پیل‌های سوختی اکسید جامد از لحاظ نوع به‌سازی به دو دسته داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع خارجی به یک منبع حرارت خارجی مانند مشعل، کوره گرم و یا یک راکتور برای انجام واکنش نیاز است، اما در نوع داخلی از حرارت آزاد شده طی واکنش الکتروشیمیایی الکترودها جهت انجام واکنش به‌سازی استفاده می‌شود؛ استفاده از این روش ملزومات خنک کاری پیل سوختی را نیز کاهش می‌دهد [2 و 3]. پیل‌های سوختی اکسید جامد از لحاظ شکل هندسی در سه نوع لوله‌ای (سیلندری)، مسطح (صفحه‌ای)، لانه زنبوری (مسطح لوله‌ای) و غلطکی تولید می‌شوند. به دلیل استفاده زیاد از پیل‌های سوختی اکسید جامد در سیستم‌های هیبریدی، نوع لوله‌ای آن نسبت به سه نوع دیگر بیشترین کاربرد را دارد. دمای کاری بالا، عدم نشت گازهای استفاده شده و تحمل فشار بالای این نوع از پیل‌های سوختی سبب شده است که نسبت به سه نوع دیگر، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد [3].

در اواخر دهه 90 میلادی، استفاده از پیل سوختی اکسید جامد به عنوان یک سیستم تولید، مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفت. در سال 1998 میلادی اولین نیروگاه 100 کیلوواتی پیل سوختی در وسترورت<sup>2</sup> هلند راه‌اندازی شد. عمر این نیروگاه 8700 ساعت با

1. Reforming  
2. West Root

مختلف در تعادل، طبق رابطه (7) نرخ مولی گازهای خروجی از پیل به دست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} [\dot{n}_{CH_4}]^{out} &= [\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x \\ [\dot{n}_{H_2O}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z \\ [\dot{n}_{H_2}]^{out} &= [\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z \\ [\dot{n}_{CO}]^{out} &= [\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y \\ [\dot{n}_{CO_2}]^{out} &= [\dot{n}_{CO_2}]^{in} + y \\ [\dot{n}_{tot}]^{out} &= [\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x \end{aligned} \quad (7)$$

با توجه به معادلات مذکور، فشار جزئی گازهای خروجی از آند و کاتد با استفاده از رابطه (8) حاصل خواهد شد:

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{tot}} P_{tot} \quad (8)$$

واکنش‌های به‌سازی و دگرگونی به دلیل دمای کاری بالای پیل، واکنش‌های تعادلی بوده و مقدار اجزای آن‌ها بستگی به ترکیب اولیه و دمای نهایی واکنش‌ها دارد. رابطه بین مقدار اجزای در تعادل، ترکیب تعادل و دمای نهایی آن، توسط ثابت تعادل برقرار می‌شود. برای دو واکنش به‌سازی و دگرگونی، ثابت‌های تعادلی به صورت دو رابطه (9) و (10) تعریف می‌شوند [16]:

$$K_{p,r} = \frac{P_{H_2}^3 \times P_{CO}}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} \quad (9)$$

$$K_{p,s} = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} \quad (10)$$

با توجه به روابط (7) تا (10) و همچنین با توجه به واکنش الکتروشیمیایی پیل، روابط (11) و (12) حاصل خواهد شد:

$$K_{p,r} = \frac{([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z)^3 \times ([\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y)}{([\dot{n}_{CH_4}]^{in} - x) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z)} \times \frac{P_{cell}^2}{([\dot{n}_{tot}]^{in} + 2x)^2} \quad (11)$$

$$K_{p,s} = \frac{([\dot{n}_{CO_2}]^{in} + y) \times ([\dot{n}_{H_2}]^{in} + 3x + y - z)}{([\dot{n}_{CO}]^{in} + x - y) \times ([\dot{n}_{H_2O}]^{in} - x - y + z)} \quad (12)$$

ثابت تعادل برای یک مخلوط گاز ایده‌آل فقط تابعی از دما می‌باشد. برای واکنش به‌سازی و دگرگونی، این دو ثابت به صورت یک تابع چندجمله‌ای و به صورت رابطه (13) بیان می‌شوند [16]:

$$\text{Log } K_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT + E \quad (13)$$

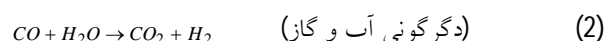
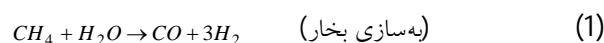
در رابطه (13)،  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $D$  و  $E$  ثابت‌های تجربی می‌باشند که در مرجع [16] آورده شده‌اند.

برای به دست آوردن سه پارامتر  $x$ ،  $y$  و  $z$  نیاز به تعریف یک رابطه دیگر است. ضریب مصرف سوخت در پیل سوختی ( $U_f$ ) به

در این مقاله، برای مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با به‌سازی داخلی مستقیم، یک مدل الکتروشیمیایی کامل ارائه شده است. محاسبه دقیق ترکیب گازهای خروجی از بخش آند و کاتد پیل، تعیین افت ولتاژهای درون پیل، محاسبه حرارت تولیدی و دمای کاری پیل و محاسبه اقتصادی پیل سوختی در مقایسه با سایر سیستم‌های تولید توان، از موارد انجام شده در این تحقیق است. سوخت به کار رفته در این تحقیق، گاز طبیعی با ترکیب 97% متان، 1/5% دی‌اکسیدکربن و 1/5% نیتروژن بوده و ترکیب هوای به کار رفته نیز شامل 21% اکسیژن و 79% نیتروژن در نظر گرفته شده است.

## 2. محاسبات به‌سازی

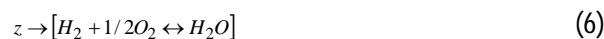
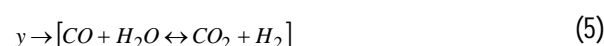
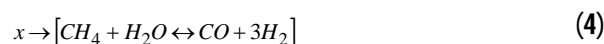
یک ویژگی مثبت برای پیل‌های سوختی اکسید جامد، توانایی استفاده هم‌زمان از هیدروژن و مونوکسیدکربن به عنوان سوخت است. این نکته که می‌توان با استفاده از یک به‌سازی داخلی مستقیم، از مونوکسید کربن و متان در داخل پیل به عنوان سوخت استفاده کرد، بسیار حائز اهمیت است. فعل و انفعال صورت گرفته در فرآیند به‌سازی داخلی به شدت گرماگیر است و حرارت مورد نیاز خود را از پیل تأمین می‌کند. استفاده از این روش، نیاز پیل به سیستم خنک‌کننده را نیز تا حدودی از بین می‌برد. واکنش‌های انجام یافته در این فرآیند به صورت روابط (1) و (2) می‌باشند [16]:



روابط (1) و (2) به ترتیب، واکنش به‌سازی بخار و دگرگونی آب و گاز<sup>1</sup> نامیده می‌شوند. طبق واکنش‌های فوق، گاز طبیعی متان در داخل پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و سپس طبق رابطه (3) در واکنش الکتروشیمیایی پیل شرکت خواهد کرد [16]:



مکانیزم واکنش‌های به‌سازی، دگرگونی و کلی در پیل سوختی طبق معادلات تعادلی (4) تا (6) می‌باشد:



در روابط فوق  $x$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب، نرخ مولی پیشرفت واکنش‌های به‌سازی، دگرگونی و واکنش کلی پیل است. با موازنه جرمی گازهای

$$i_{o,ca} = \gamma_{ca} \left( \frac{PO_2}{P_{ref}} \right)^{0.25} \exp \left( - \frac{E_{act,ca}}{R_u T} \right) \quad (20)$$

در روابط (19) و (20)،  $\gamma$  پارامتری است که مقدار آن به جنس الکتروند و کاتد بستگی دارد و  $E$  مقدار انرژی فعال سازی می باشد [13].

مقاومت های ناشی از حرکت الکترون ها در آند، کاتد و متصل کننده داخلی و حرکت یونها در الکترولیت، سبب ایجاد افت ولتاژ اهمی می شود. بر این اساس، افت یا اضافه ولتاژ اهمی برای آند، کاتد، متصل کننده های داخلی و الکترولیت با استفاده از روابط (21) تا (24) به دست خواهند آمد [13]:

$$V_{ohm} = V_{ohm,an} + V_{ohm,ca} + V_{ohm,el} + V_{ohm,in} \quad (21)$$

$$V_{ohm} = ir \quad (22)$$

$$r = \delta \rho \quad (23)$$

$$\rho = A \exp \left( \frac{B}{T} \right) \quad (24)$$

مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $\delta$  پارامترهای ثابتی است که بسته به نوع پیل به دست می آیند. در این تحقیق از مقادیر جدول (1) استفاده شده است.

جدول (1): پارامترهای مربوط به افت ولتاژ اهمی [13]

اجزا	$A (\Omega - m)$	$B (K)$	$\delta (m)$
کاتد	0/0000811	600	0/0022
آند	0/0000298	-1392	0/0001
الکترولیت	0/0000294	10350	0/00004
جدداکننده ها	0/0012	4690	0/000085

وقتی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته شود، فشار جزئی هیدروژن و هوا کاهش پیدا می کند. به بیان دیگر، می توان این گونه بیان کرد که در این حالت، نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق ندارد و باعث افت ولتاژ شدید در پیل می گردد. افت مربوط به غلظت در چگالی جریان های بالا اهمیت پیدا می کند. مقدار این افت با استفاده از روابط (25) تا (27) به دست خواهد آمد [13]:

$$V_{conc} = V_{conc}^{an} + V_{conc}^{ca} \quad (25)$$

$$V_{conc}^{an} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1 - i / i_{L,H_2}}{1 + i / i_{L,H_2O}} \right) \quad (26)$$

$$V_{conc}^{ca} = \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{1}{1 - i / i_{L,O_2}} \right) \quad (27)$$

در روابط بالا،  $i_L$  چگالی جریان حدی است؛ عموماً باید سعی شود که عملکرد پیل هیچ گاه به این منطقه نزدیک نشود [18].

صورت نسبت هیدروژن واکنش داده در آند به هیدروژن ورودی به آن تعریف می شود و طبق رابطه (14) به دست می آید.

$$U_f = \frac{z}{3x + y} \rightarrow z = U_f \times (3x + y) \quad (14)$$

با محاسبه دستگاه معادلات غیر خطی متشکل از معادلات (11)، (12) و (14) می توان مقدار و ترکیب گازهای خروجی از پیل را معین کرد.

### 3. محاسبات الکتروشیمیایی

حل کلی معادلات بقای جرم و انرژی پیل سوختی نیاز به ارزیابی ولتاژ و جریان تولید شده در پیل دارد. ولتاژ برگشت پذیر پیل سوختی توسط معادله نرنست<sup>1</sup> و به شکل رابطه (15) تعریف می گردد [17]:

$$E = E^{\circ} + \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

در رابطه بالا  $E^{\circ}$  ولتاژ پیل سوختی در شرایط استاندارد،  $R_u$  ثابت عمومی گازها،  $T$  دمای توده پیل،  $F$  ثابت فارادی و  $n_e$  تعداد الکترون های جریان یافته در مدار به ازای تشکیل هر مولکول آب است. برای محاسبه ولتاژ واقعی پیل باید افت های مربوط به پیل (اضافه ولتاژ پیل) که شامل افت ولتاژ ناحیه فعال سازی، افت ولتاژ ناحیه اهمی و افت ولتاژ ناحیه غلظت می باشند، محاسبه شود و در نهایت از رابطه زیر مقدار ولتاژ واقعی آن به دست آید [13 و 17]:

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{ohm} + V_{conc}) = E - \Delta V_{Loss} \quad (16)$$

مقدار افت مربوط به فعال سازی شامل افت های مربوط به راه اندازی پیل و همچنین غلبه بر کلیه واکنش های الکتروشیمیایی می باشد. مقدار این افت برابر مجموع اضافه ولتاژ فعال سازی آند و کاتد پیل بوده و با ساده سازی رابطه باتلر-ولمر<sup>2</sup> طبق روابط (17) و (18) به دست خواهد آمد [13]:

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,ca} \quad (17)$$

$$V_{act} = \frac{2R_u T}{n_e F} \sinh^{-1} \left( \frac{i}{2i_o} \right) \quad (18)$$

در رابطه (18)،  $i$  و  $i_o$  به ترتیب برابر چگالی جریان و چگالی جریان تبدلی می باشند. محاسبه مقدار چگالی جریان تبدلی بسیار پیچیده بوده و برای آند و کاتد یک پیل سوختی اکسید جامد از دو رابطه نیمه تجربی (19) و (20) به دست می آید [13].

$$i_{o,an} = \gamma_{an} \left( \frac{PH_2}{P_{ref}} \right) \left( \frac{PH_2O}{P_{ref}} \right) \exp \left( - \frac{E_{act,an}}{R_u T} \right) \quad (19)$$

1. Nernst  
1. Butler-Volmer

پیل سوختی می‌باشد. عدم توجه به این مسئله سبب بالا رفتن دمای گازهای خروجی از پیل و در نتیجه، آسیب دیدن آن خواهد شد.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}' + \dot{Q}_{surr} \quad (38)$$

با توجه به رابطه (39) دمای گازهای خروجی از پیل که تقریباً برابر دمای کاری پیل است، به دست می‌آید.

$$(\dot{n}_{ca}\bar{h}_{ca} + \dot{n}_{an}\bar{h}_{an})_{in} = \dot{Q}_{surr} + \dot{W}_{out} + (\dot{n}_{ca}\bar{h}_{ca} + \dot{n}_{an}\bar{h}_{an})_{out} \quad (39)$$

در نهایت با در نظر گرفتن کل پیل به عنوان یک حجم کنترل، راندمان‌های الکتریکی، حرارتی و کل آن، با استفاده از روابط (40) تا (42) به دست خواهند آمد:

$$\eta_{ele} = \frac{Power_{AC-tot}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (40)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{net}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (41)$$

$$\eta_{tot} = \frac{Power_{AC-tot} + \dot{Q}_{net}}{\dot{n}_f \times LHV} \quad (42)$$

## 5. محاسبات اقتصادی

برای ارزیابی و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌های انرژی به مقایسه مقادیر سالانه هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری، هزینه‌های سوخت و هزینه‌های عملکرد و نگهداری نیاز است. بیان عبارات بالا در حالت ایده‌آل در رابطه (43) خلاصه می‌شود، که تعادل هزینه را برای کل سیستم بیان می‌کند [19].

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (\$/hr) \quad (43)$$

این معادله بیان می‌کند که نرخ هزینه در ارتباط با تولید سیستم  $(\dot{C}_{P,tot})$  برابر مجموع نرخ هزینه سوخت  $(\dot{C}_{F,tot})$  و هزینه مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه  $(\dot{Z}_{tot}^{CI})$  و هزینه مربوط به تعمیر و نگهداری  $(\dot{Z}_{tot}^{OM})$  می‌باشد. این معادله همچنین نشان می‌دهد که هرچه هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری بالاتر باشد، هزینه محصول تولیدی بیشتر خواهد بود. مجموع هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری، مطابق رابطه (44) به صورت یک پارامتر واحد به نام  $\dot{Z}$  معرفی می‌گردند [19].

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (\$/hr) \quad (44)$$

از آنجا که در این تحقیق، برق تولیدی به عنوان محصول تولیدی و گاز طبیعی مصرفی به عنوان سوخت مصرف شده در نظر گرفته شده است، رابطه (43) به معادله (45) تبدیل می‌شود. این معادله همان تابع هدف در بهینه‌سازی است که باید هزینه تولید برق در آن حداقل شود.

پس از محاسبه افت ولتاژهای اشاره شده، مقدار ولتاژ واقعی تک سل پیل سوختی طبق رابطه (16) به دست خواهد آمد. مقدار جریان و توان هر سل نیز طبق روابط (28) و (29) به دست خواهد آمد.

$$I_{cell} = iA_{cell} \quad (28)$$

$$Power_{DC-cell} = V_{cell} \times I_{cell} \quad (29)$$

با مشخص شدن مقدار جریان و توان هر سل و همچنین با محاسبه مقدار نرخ مولی پیشرفت واکنش کلی پیل (z) از روابط (11)، (12) و (14)، می‌توان با استفاده از روابط (30) تا (33) مقادیر جریان و توان کلی در توده پیل و همچنین تعداد سل‌های به کار رفته در آن را نیز مشخص کرد.

$$I_{tot} = 2Fz \quad (30)$$

$$Power_{DC-tot} = V_{cell} I_{tot} \quad (31)$$

$$Power_{AC-tot} = Power_{DC-tot} \times \eta_{inv} \quad (32)$$

$$n = Power_{DC-tot} / Power_{DC-cell} \quad (33)$$

در روابط بالا،  $\eta_{inv,FC}$  ضریب تبدیل جریان مستقیم به متناوب و n تعداد سل‌های به کار رفته در توده است.

## 4. محاسبات حرارتی

دمای گازهای خروجی از پیل سوختی می‌تواند با موازنه انرژی و همچنین استفاده از روش تکرار محاسبه گردد. با توجه به اینکه واکنش به‌سازی (رابطه 1) گرماگیر است و واکنش دگرگونی (رابطه 2) و واکنش الکتروشیمیایی پیل (رابطه 3) گرمازا می‌باشند، لذا کل انتقال حرارت خالص پیل سوختی اکسید جامد از اختلاف مقادیر گرمایی سه واکنش مذکور و طبق رابطه (34) به دست خواهد آمد.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{elec} + \dot{Q}_{sh} - \dot{Q}_r \quad (34)$$

مقدار گرمای حاصل از واکنش‌های به‌سازی، دگرگونی و واکنش الکتروشیمیایی پیل طبق روابط (35) تا (37) به دست می‌آیند [16].

$$\dot{Q}_r = x(\bar{h}_{CO} + 3\bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CH_4} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{sh} = y(\bar{h}_{CO_2} + \bar{h}_{H_2} - \bar{h}_{CO} - \bar{h}_{H_2O}) \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{elec} = zT\Delta S - I\Delta V_{Loss} \quad (37)$$

$$\Delta S = \left( S_{H_2O}^{\circ} - S_{H_2}^{\circ} - \frac{1}{2}S_{O_2}^{\circ} \right) + \frac{R_u}{2} \ln \left( \frac{P_{H_2} \times P_{O_2}}{P_{H_2O}^2} \right)$$

همان‌طور که در رابطه (38) نیز نشان داده شده، مقداری از این گرمای خالص باقی‌مانده صرف افزایش دمای گازهای داخل و خروجی پیل شده  $(\dot{Q}')$  و بخش دیگری نیز به محیط  $(\dot{Q}_{surr})$  وارد می‌شود. نکته مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد، آدیاباتیک نبودن

بهره (i) و تعداد سال‌های عملکرد دستگاه‌ها (n) است و با توجه به مقادیر این دو پارامتر محاسبه می‌شود [19]. در تحلیل‌های ترموآکونومیکی معمولاً مقدار این ضریب در محدوده 0/147 تا 0/18 برآورد می‌شود. در رابطه (48) نرخ بهره یا کاهش ارزش پول برابر 0/1 تا 0/12 در نظر گرفته شده است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (48)$$

در این بخش، معادلات مربوط به تعیین قیمت خرید پیل سوختی، تبدیل‌کننده جریان و تجهیزات جانبی آن بر اساس پارامترهای ترمودینامیکی موجود به دست می‌آیند [20].

$$PEC_{sofc} = A_{sofc} [2.96T_{cell} - 1907] \quad (49)$$

$$PEC_{inv} = 10^5 \left( \frac{\dot{W}_{cell}}{500} \right)^{0.7} \quad (50)$$

$$PEC_{sofc,aux} = 0.1PEC_{sofc} \quad (51)$$

همان‌طور که در روابط (49) تا (51) دیده می‌شود، قیمت پیل سوختی تابع سطح و دمای کاری آن است. افزایش دمای کاری پیل از یک سو سبب بالا رفتن توان تولیدی آن شده و از سوی دیگر، سبب بالا رفتن قیمت پیل سوختی خواهد شد.

## 6. روش حل

جهت تحلیل مسئله یک برنامه رایانه‌ای در نرم‌افزار EES نوشته شده است که روند آن، مطابق روندنمای زیر است (شکل 2). در بخش اول این برنامه، اطلاعات ورودی پیل شامل فشار کاری، چگالی جریان، دبی هوا و دبی سوخت ورودی به آن وارد می‌گردند. در این مرحله با توجه به ثابت نبودن دمای کاری پیل، حدس اولیه‌ای از دمای پیل زده می‌شود. با حدس دمای پیل در مرحله بعدی معادلات غیرخطی به‌سازی و الکتروشیمیایی به همراه معادلات حرارتی و اقتصادی پیل به طور هم‌زمان حل شده و نتایج مطلوب شامل محاسبه ترکیب اجزای شیمیایی گازهای خروجی، دما، افت ولتاژ، ولتاژ واقعی، جریان، توان، راندمان، قیمت برق تولیدی، هزینه‌های نصب و راه‌اندازی و سایر خواص پیل سوختی حاصل می‌شود.

$$c_P \dot{W}_{net} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (45)$$

در این رابطه،  $c_P$  برابر هزینه تولید برق بر واحد گیگاژول برق تولیدی است. با توجه به معادلات مذکور، هزینه تولید برق طبق رابطه (46) محاسبه می‌شود.

$$c_P = \frac{\dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM}}{\dot{W}_{net}} \quad (46)$$

معمولاً در تحلیل ترموآکونومیکی، به‌ویژه در سیستم‌های بزرگ و پیچیده، مشکل‌ترین بخش مدل‌سازی اقتصادی است. صحت یک تحلیل ترموآکونومیکی بستگی به درستی هرچه بیشتر مدل اقتصادی لحاظ شده در محاسبه  $\dot{Z}$  دارد [19]. در تحلیل و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌های انرژی، باید هزینه سالیانه سرمایه‌گذاری، هزینه سوخت و هزینه عملکرد و نگهداری سیستم‌ها محاسبه شوند. سری مقادیر مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری و مخارج برای کارکرد سیستم در طول سال‌های متوالی یکنواخت نیست. به طور کلی، می‌توان گفت با افزایش تعداد سال‌های کارکرد سیستم، هزینه‌های سوخت افزایش و هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد. در مدل‌های اقتصادی قیمت خرید تجهیزات، زمین، هزینه ساخت، هزینه‌های طراحی و... به عنوان بخشی از هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری در نظر گرفته می‌شود و هزینه‌های عملیاتی نیز از طریق اعمال ضرایبی تجربی در قیمت خرید تجهیزات لحاظ می‌شود. با توجه به موارد فوق، برای تحلیل‌های اقتصادی این تحقیق، از مدل اقتصادی ساده‌لازارتو استفاده شده است. این مدل یکی از ساده‌ترین مدل‌های اقتصادی بوده و توسط لازارتو استاد دانشگاه میلان ارائه شده است. مجموع هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری در این مدل، مطابق رابطه (47) ارائه شده است [18]:

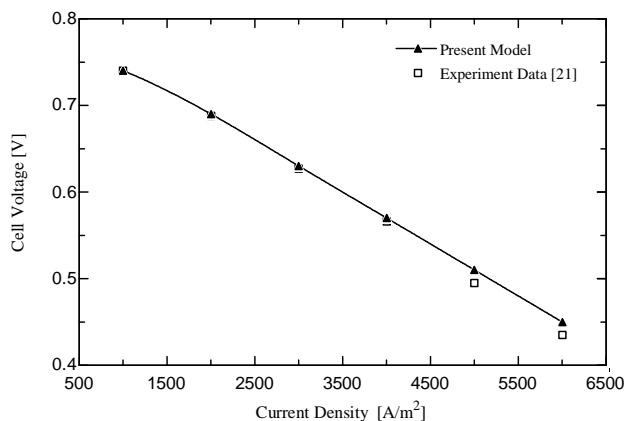
$$\dot{Z}_k = (\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}) = CRF \frac{\Phi_r}{N \times 3600} PEC_k \left[ \frac{\$}{s} \right] \quad (47)$$

در این رابطه،  $PEC_k$  هزینه اولیه خرید دستگاه  $k$  (که بر اساس پارامترهای ترمودینامیکی محاسبه می‌شود)،  $\Phi_r$  هزینه تعمیرات و نگهداری (1/1-1/06)،  $N$  تعداد ساعات کارکرد سالانه سیستم تحت بار کامل (85 درصد از ظرفیت کل کاری و برابر 7446 ساعت) و  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه است. ضریب بازگشت سرمایه همان‌طور که در رابطه (48) نشان داده شده است، خود تابعی از نرخ

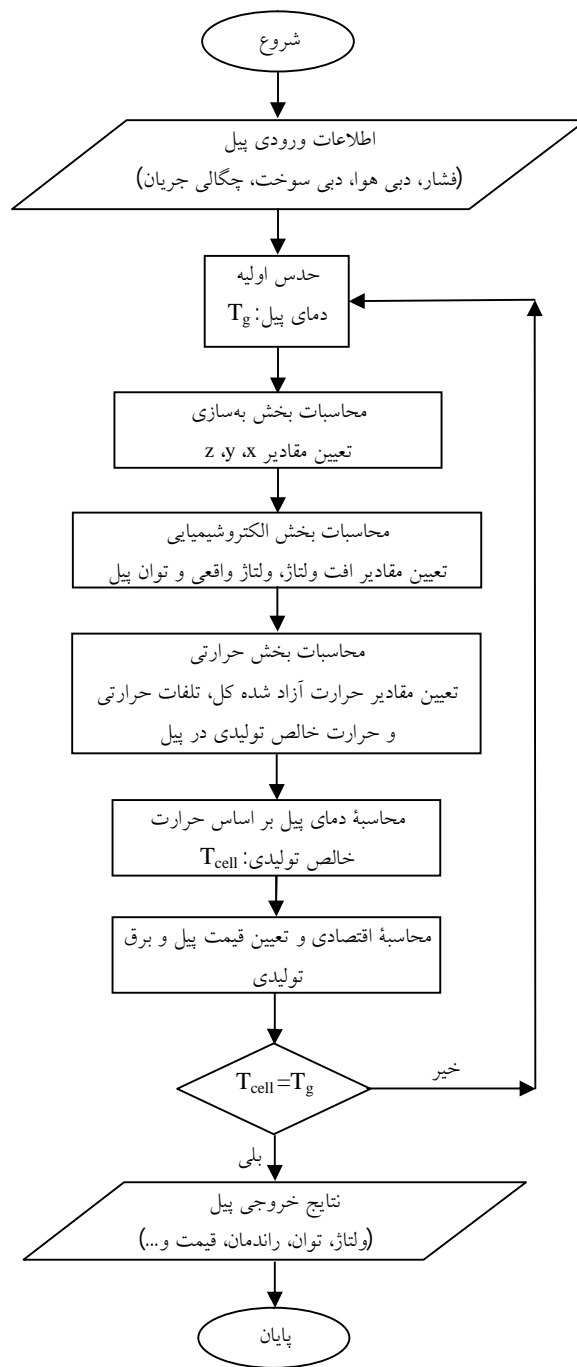
### 7. اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی برنامه تهیه شده، لازم است برای یک نمونه معین، نتایج حاصل از این برنامه تهیه شده با نتایج تست‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شود. با توجه به کمبود نتایج تجربی در زمینه پیل‌های سوختی اکسید جامد، در این تحقیق با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته توسط سینگال [21] به اعتبارسنجی برنامه تهیه شده در این پژوهش پرداخته شده است.

سینگال در تحقیقی عملکرد یک پیل سوختی اکسید جامد را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده بود. نتایج آزمایشگاهی وی بر مبنای سوختی به دست آمده بود که از 89 درصد هیدروژن و 11 درصد آب تشکیل شده بود. با مدل‌سازی عددی پیل سوختی به کار رفته توسط سینگال و با اعمال شرایط کاری مشابه، ولتاژ و توان تولیدی پیل در چگالی جریان‌های مختلف به دست آمد. همان‌طور که در منحنی قطبش در شکل (3) و منحنی توان در شکل (4) دیده می‌شود، هم‌خوانی نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از این تحقیق، صحت برنامه تهیه شده را نشان می‌دهد. خطای دیده شده در دو شکل مربوط به چگالی‌های جریان بالا می‌باشد. با توجه به اینکه در محاسبه افت ولتاژ غلظتی از ضرایب تجربی استفاده شده است، دلیل خطاهای دیده شده می‌تواند به خاطر مقدار استفاده شده برای این ضرایب باشد.



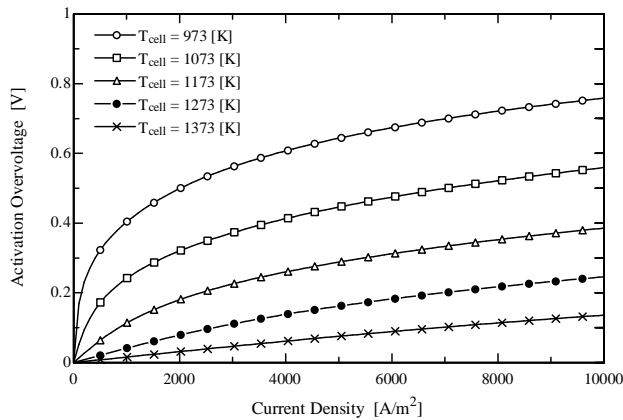
شکل (3): مقایسه منحنی قطبش نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی حاصل از برنامه تهیه شده



شکل (2): روندنمای حل مسئله

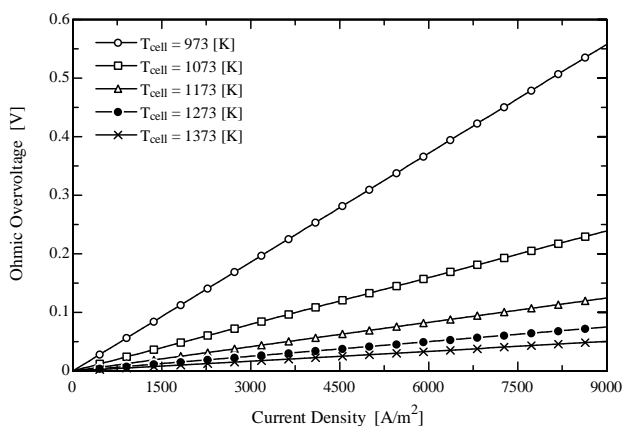
نرم‌افزار EES با توجه به قابلیت بالای خود در یک زمان واحد می‌تواند تعداد زیادی معادله خطی و غیرخطی را تحلیل کند. پس از تحلیل کامل، دمای جدید پیل با توجه به شرایط داده شده به دست خواهد آمد. در صورت عدم برقراری شرط همگرایی، چرخه تحلیل با دمای جدید دوباره تکرار خواهد شد.

نشان دهنده نرخ بالای فعل و انفعال شیمیایی در پیل بوده، لذا به انرژی کمتری برای راه اندازی نیاز خواهد بود. همان طور که در این شکل دیده می شود، با افزایش چگالی این افت بیشتر خواهد شد.

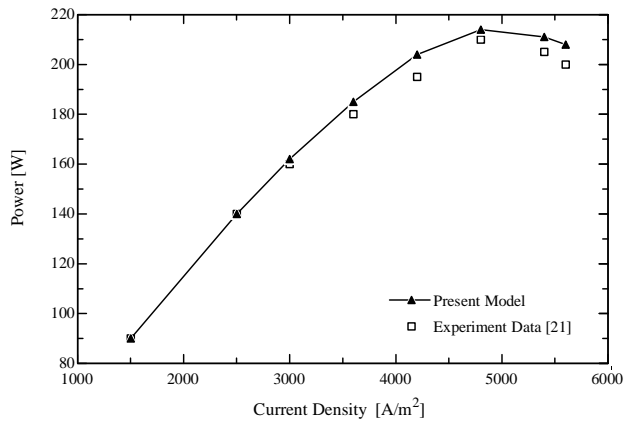


شکل (5): تغییرات افت ولتاژ فعال سازی نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar

افت ولتاژ اهمی یا افت ولتاژ ناشی از مقاومت در پیل به علت مقاومت اهمی در آند، کاتد، الکترولیت ها و دیگر رساناهای داخلی موجود در پیل به وجود می آید. پیل سوختی اکسید جامد به سبب شکل و طرح فیزیکی خود به شدت تحت تأثیر این افت ها قرار دارد و مقدار این افت برای این نوع پیل به شکل غیر منتظره ای بیشتر از انواع دیگر پیل های سوختی می باشد. این افت ولتاژ رابطه ای نسبتاً خطی با چگالی جریان دارد. همان طور که در شکل (6) دیده می شود، با افزایش دما به دلیل کاهش مقاومت ویژه اجزای پیل، افت ولتاژ اهمی کاهش پیدا می کند و با افزایش چگالی جریان، این افت افزایش می یابد. تلفات اهمی به شدت تابع دما می باشد، به خصوص در مورد الکترولیت که بخش عمده ای از تلفات پیل در این بخش اتفاق می افتد.



شکل (6): تغییرات افت ولتاژ اهمی نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar



شکل (4): مقایسه منحنی توان نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی حاصل از برنامه تهیه شده

## 8. نتایج

در این تحقیق، چگالی جریان، ضریب مصرف سوخت، دما، فشار و همچنین نسبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به عنوان پنج پارامتر اثرگذار بر عملکرد پیل سوختی در نظر گرفته شده اند. هدف این تحقیق، بررسی تأثیر این پارامترها بر روی ولتاژ و توان خروجی و همچنین راندمان پیل است. جهت تحلیل دقیق مسئله، ابتدا عملکرد یک تک سل به کار رفته در پیل تحت دما و فشار کاری مختلف بررسی شده و سپس در ادامه عملکرد یک توده کامل تحت شرایط مختلف کاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، پیل سوختی به کار رفته در این تحقیق از نوع اکسید جامد لوله ای بوده که طرح آن مشابه مدل ساخته شده در شرکت زیمنس وستینگهاوس می باشد [22]. مشخصات پیل سوختی به کار رفته در این تحقیق در جدول (2) آورده شده است.

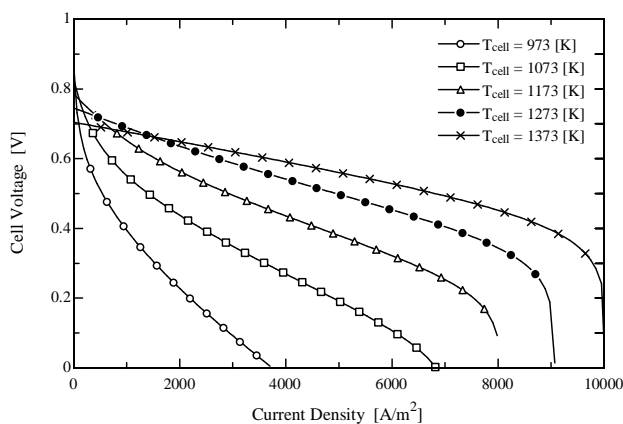
جدول (2): مشخصات هندسی پیل سوختی به کار رفته در این تحقیق [22]

پارامتر	واحد	مقدار فرض شده
مساحت هر سل	سانتی متر مربع	1036/2
طول هر سل	سانتی متر	150
قطر هر سل	سانتی متر	2/2
تعداد سل	عدد	5133

برای راه اندازی پیل و چیره شدن بر همه واکنش های الکتروشیمیایی و آغاز گرفتن جریان از سیستم مقداری انرژی لازم است؛ این انرژی را انرژی راه اندازی و افت ناشی از آن را افت ولتاژ ناشی از راه اندازی پیل (فعال سازی) می گویند. مقدار این افت با استفاده از روابط (17) و (18) به دست خواهد آمد. نتایج به دست آمده در شکل (5) نشان می دهد که مقدار بالای دمای توده پیل



منحنی قطبیت پیل سوختی در یک سل، بیان‌کننده ولتاژ سل بر حسب چگالی جریان گرفته شده از آن است. همان‌طور که در شکل‌های (5) تا (7) مشاهده شد، افزایش دمای کاری پیل سبب کاهش افت ولتاژهای فعال‌سازی، اهمی و غلظتی در آن می‌شود که این مسئله به نوبه خود، سبب افزایش ولتاژ تولیدی پیل خواهد شد. همان‌طور که در شکل (9) دیده می‌شود، افزایش دمای کاری پیل سبب بالا رفتن نرخ فعل و انفعال شیمیایی در آن شده، در نتیجه این کار سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد پیل خواهد شد، در حالی که با کاهش دمای کاری پیل به دلیل تأثیر زیاد افت ولتاژ غلظتی، افت شدیدی در ولتاژ تولیدی پیل ایجاد می‌گردد.

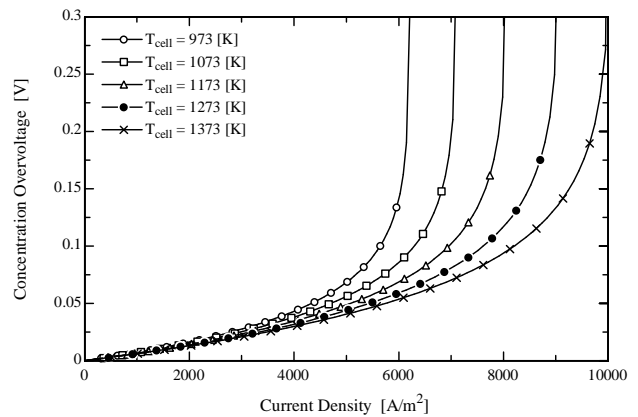


شکل (9): تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar

همان‌طور که در شکل (9) دیده می‌شود، با افزایش چگالی جریان، ولتاژ تولیدی در پیل کاهش می‌یابد. با افزایش چگالی جریان و در دماهای کاری بالا، سه ناحیه مختلف در منحنی قطبیت پیل دیده می‌شود. در چگالی‌های پایین مقدار افت ولتاژ ناچیز بوده و مقدار ولتاژ در حالت مدار باز تقریباً برابر با مقدار ایده‌آل آن است. با افزایش چگالی جریان اثر افت ولتاژ فعال‌سازی سبب کاهش ناگهانی ولتاژ تولیدی پیل می‌شود. در بخش میانی نمودار یک افت ولتاژ خطی با سرعت کم دیده می‌شود که مربوط به افت ولتاژ اهمی است. با افزایش چگالی جریان به دلیل تأثیر زیاد افت ولتاژ غلظتی، افت ولتاژ پیل به شدت افزایش می‌یابد و این مسئله سبب کاهش ولتاژ تولیدی آن می‌گردد. در دماهای کاری پایین، ولتاژ تولیدی در پیل در چگالی‌های پایین با شیب زیادی کاهش پیدا می‌کند؛ دلیل این مسئله بالا بودن افت ولتاژ فعال‌سازی است.

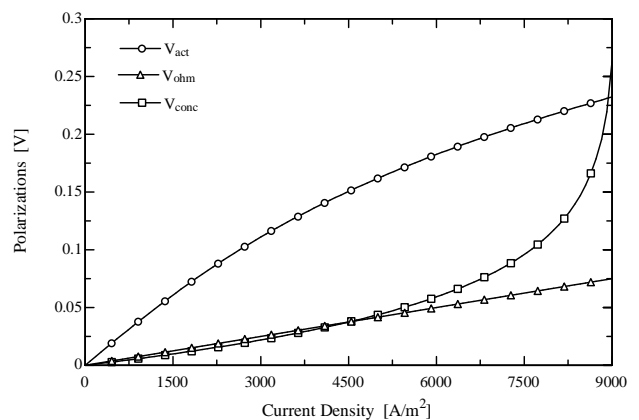
در شکل (10)، نمودار تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان، در فشارهای کاری مختلف نشان داده شده است. به طور کلی، افزایش

زمانی که شدت جریان بالایی از پیل گرفته شود، فشارهای جزئی هیدروژن و هوا کاهش پیدا می‌کند. به بیان دیگر، نرخ تولید جریان با تقاضا تطابق ندارد و باعث ایجاد افت شدید در پیل می‌گردد، لذا همواره سعی در آن است که هیچ‌گاه عملکرد پیل به این منطقه نرسد. همان‌طور که در شکل (7) دیده می‌شود، با افزایش دما چگالی جریان حادی افزایش پیدا می‌کند و پیل در چگالی‌های بالاتری دچار افزایش افت ولتاژ غلظتی می‌شود. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در چگالی‌های پایین مقدار این افت کم است، لذا بهتر است که چگالی جریان پیل در این محدوده در نظر گرفته شود.

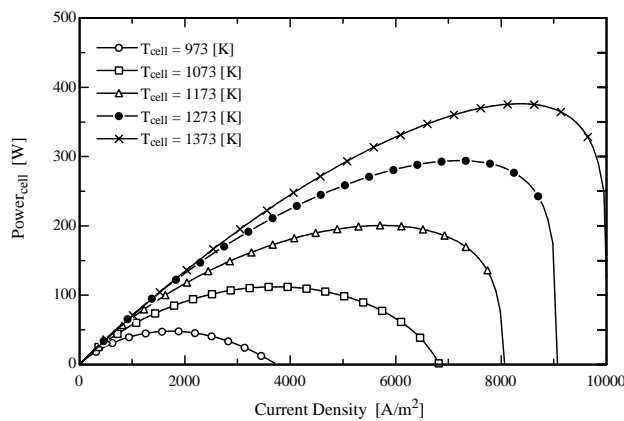


شکل (7): تغییرات افت ولتاژ غلظتی نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar

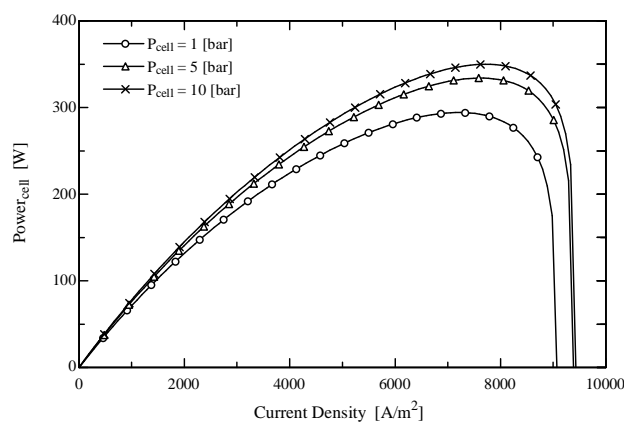
در شکل (8)، نمودار تغییرات افت ولتاژهای فعال‌سازی ( $V_{act}$ )، اهمی ( $V_{ohm}$ ) و غلظتی ( $V_{conc}$ ) نسبت به چگالی جریان نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در چگالی‌های پایین افت ولتاژ فعال‌سازی و در چگالی‌های بالا افت ولتاژ غلظتی نقش مهمی در تلفات پیل دارند.



شکل (8): نمودار تغییرات افت ولتاژهای مختلف پیل نسبت به چگالی جریان



شکل (11): تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar

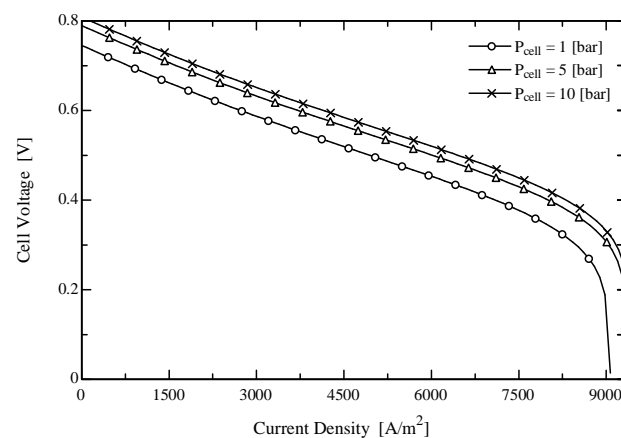


شکل (12): تغییرات توان تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری 1273 K

در شکل (13) و (14)، تغییرات حرارت تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان آن در شرایط مختلف کاری نشان داده شده است. همانطور که در شکل (13) دیده می شود با افزایش دمای کاری پیل به دلیل تولید توان الکتریکی بیشتر، حرارت تولیدی در آن کاهش پیدا خواهد کرد. این مسئله در مورد پارامتر فشار نیز صدق می کند و با افزایش فشار حرارت تولیدی کاهش پیدا می کند (شکل 14). همانطور که در هر دو شکل دیده می شود، افزایش چگالی جریان سبب افزایش فعل و انفعالات شیمیایی در پیل شده و این مسئله به نوبه خود سبب بالا رفتن حرارت تولیدی در پیل خواهد شد. مشابه نمودار توان و ولتاژ، با افزایش بیش از حد چگالی جریان مقدار حرارت تولیدی به شدت افزایش خواهد یافت؛ این مسئله بسیار خطرناک است و ممکن است به پیل آسیب برساند. بدین منظور باید چگالی جریان گرفته شده از پیل در نقطه طراحی، در ناحیه افت های ناشی از مقاومت و به دور از ناحیه غلظت باشد تا سیستم بتواند توان الکتریکی خود را به صورت پایدار تولید کند.

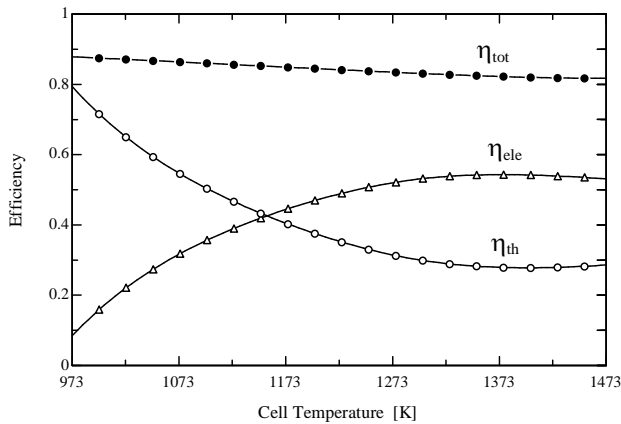
فشار سبب بالا رفتن مقدار ولتاژ ایده آل در پیل می گردد که این مسئله سبب خواهد شد که با افزایش فشار، نرخ فعل و انفعال شیمیایی در پیل بالا رود و ولتاژ تولیدی در آن نیز بیشتر شود. همانطور که در این شکل دیده می شود، با افزایش چگالی جریان، ولتاژهای تولید شده در فشارهای کاری مختلف شیب نزولی مشابهی خواهند داشت و بر خلاف پارامتر دما، در فشارهای کاری مختلف مقدار افت ولتاژ غلظتی در چگالی جریان های بالاتر اتفاق می افتد.

مقایسه نتایج دو شکل (9) و (10) نشان می دهد که در مقایسه با فشار کاری پیل ( $P_{cell}$ )، دمای کاری آن پارامتر مؤثرتری در تغییرات ولتاژ پیل خواهد بود.



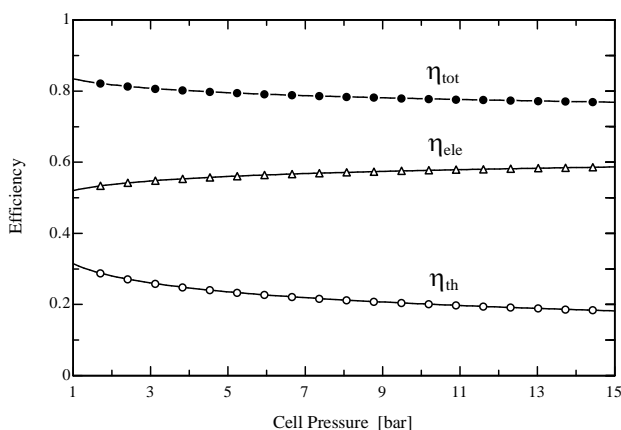
شکل (10): تغییرات ولتاژ پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری 1273 K

در شکل های (11) و (12)، تغییرات توان تولیدی یک سل پیل نسبت به چگالی جریان، در دو حالت مختلف کاری بررسی شده است. همانطور که در شکل (11) دیده می شود، در یک چگالی جریان ثابت، افزایش دمای سل باعث افزایش توان و کارایی آن می گردد. در یک دمای کاری ثابت، با افزایش چگالی جریان توان تولیدی در سل افزایش پیدا می کند و به بیشینه مقدار خود می رسد. اگرچه به نظر می رسد مقدار بهینه طراحی در نقطه بیشینه نمودارهای فوق رخ می دهد، نزدیک بودن آن به ناحیه افت های ناشی از غلظت برای پیل به شدت خطرناک است. در شکل (12) دیده می شود که در یک چگالی جریان ثابت، با افزایش فشار کاری سل، عملکرد آن بهتر، و توان تولیدی در آن بیشتر شده است. همچنین در چگال های جریان بالاتر افت ولتاژ غلظتی تأثیر خود را نشان داده و توان تولیدی به شدت افت کرده است. از نتایج دیگر این بخش می توان به تأثیر کمتر فشار (در مقایسه با دما) بر روی افت ولتاژ غلظتی و چگالی جریان حدی در پیل اشاره کرد.



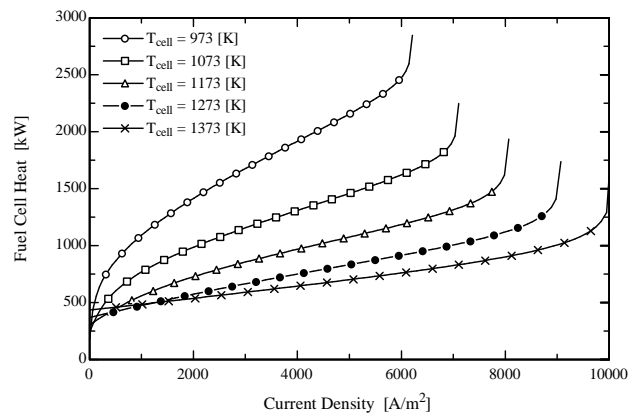
شکل (15): تغییرات بازده کلی، الکتریکی و حرارتی توده پیل سوختی نسبت به دمای پیل در فشار کاری 1 bar

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم هیبریدی فشار کاری پیل است. شکل (16) تغییرات راندمان کلی، الکتریکی و حرارتی توده پیل را نسبت به فشار کاری آن نشان می‌دهد. افزایش فشار کاری پیل، باعث افزایش تابع گیس و در نتیجه افزایش ولتاژ خروجی در آن خواهد شد؛ این امر به نوبه خود باعث افزایش راندمان الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی آن خواهد شد. همان‌طور که در شکل (16) دیده می‌شود، افزایش فشار کاری پیل تأثیر زیادی بر راندمان الکتریکی آن نداشته و سبب افزایشی در حدود 5 درصد در راندمان الکتریکی خواهد شد. مقایسه نتایج این دو بخش نشان می‌دهد که افزایش دمای کاری پیل در مقایسه با فشار کاری آن، اثرگذاری بیشتری بر روی کارایی سیستم هیبریدی خواهد داشت.

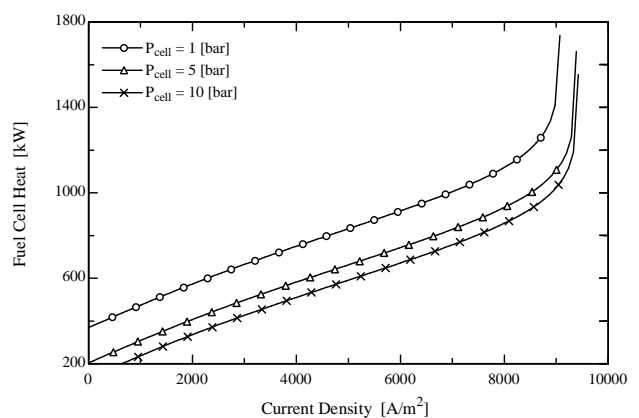


شکل (16): تغییرات بازده کلی، الکتریکی و حرارتی توده پیل سوختی نسبت به فشار پیل در دمای کاری 1273 K

در ادامه این تحقیق، با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای مربوط به پیل مانند دما و فشار کاری، ضریب مصرف سوخت و چگالی جریان می‌توان با تغییر مقدار دبی سوخت و هوای ورودی، عملکرد سیستم را

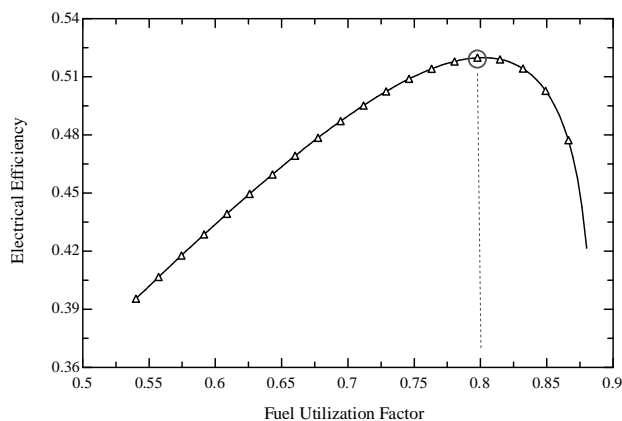


شکل (13): تغییرات حرارت تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در فشار کاری 1 bar



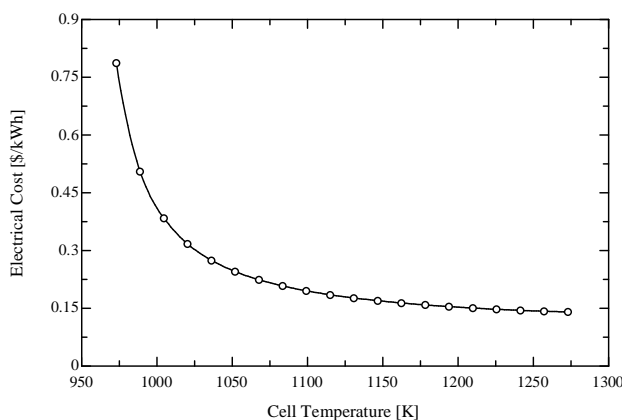
شکل (14): تغییرات حرارت تولیدی پیل نسبت به چگالی جریان در دمای کاری 1273 K

در شکل (15) راندمان کلی ( $\eta_{tot}$ )، الکتریکی ( $\eta_{ele}$ ) و حرارتی ( $\eta_{th}$ ) توده کامل پیل سوختی، در دماهای مختلفی از عملکرد آن نشان داده شده است. نتایج بیانگر افزایش راندمان الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی و کل در اثر افزایش دمای کاری پیل است. همان‌طور که در بخش مربوط به نتایج تک سل ارائه شد، افزایش دمای کاری پیل سبب افزایش ولتاژ خروجی و بهبود عملکرد آن خواهد شد. با توجه به افزایش توان الکتریکی تولیدی، مقدار حرارت تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد. با توجه به محدوده دمایی کاربرد پیل‌های سوختی اکسید جامد، نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با افزایش دمای کاری پیل به بیشینه افزایش راندمان الکتریکی در حدود 50 درصد در توده پیل دست یافت. با توجه به محدوده کاری پیل، افزایش راندمان‌های الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی تا یک حد مشخص صورت گرفته و سپس مقدار ثابتی را به خود خواهد گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده هم‌زمان از گرما و حرارت راندمان پیل نزدیک به 80 درصد خواهد بود.



شکل (18): تغییرات بازده الکتریکی توده پیل سوختی نسبت به ضریب مصرف سوخت

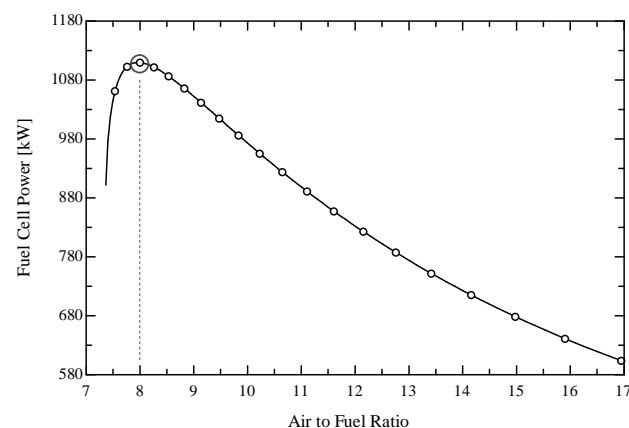
در ادامه، سیستم پیل سوختی اکسید جامد به کار رفته در این تحقیق از لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. چنان که در بخش معادلات حاکم بیان شد، در این تحقیق از مدل اقتصادی لازارتو جهت محاسبه قیمت برق تولیدی در سیستم استفاده شده است. در شکل (19) قیمت برق تولیدی سیستم نسبت به دمای کاری پیل نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دمای کاری پیل به دلیل افزایش توان تولیدی سیستم، قیمت برق تولیدی کاهش پیدا کرده است، چنان که در دمای 1273 K قیمت برق تولیدی در حدود 14 سنت به دست آمده است. از سوی دیگر در شکل (20) نیز هزینه خرید، نصب و راه‌اندازی سیستم نسبت به تغییرات دمای کاری پیل نشان داده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که افزایش دمای کاری پیل سبب کاهش هزینه‌های مربوط به آن خواهد شد. در دمای 1273 K هزینه یک مجموعه تولید توان با مولد پیل سوختی در حدود 1900 دلار بر کیلووات برآورد شده است.



شکل (19): تغییرات قیمت برق تولیدی در توده پیل سوختی نسبت به دمای کاری پیل

مورد بررسی قرار داد. افزایش دبی سوخت ورودی به همراه ثابت ماندن ضریب مصرف سوخت، به این معنی است که انرژی شیمیایی بیشتری در پیل در حال تبدیل به انرژی الکتریکی است. در این حالت، سوخت بیشتر و در نتیجه هوای بیشتری در پیل مصرف خواهد شد. این افزایش باعث بیشتر شدن اضافه ولتاژ پیل شده و تولید گرمای بیشتری را در آن سبب می‌شود. به طور کلی، افزایش دبی سوخت، اثر مطلوبی بر عملکرد سیستم ندارد و تنها اثر مثبت این پارامتر در افزایش توان سیستم است. با توجه به موارد بیان شده باید برای نسبت هوا به سوخت ورودی به سیستم، یک مقدار بهینه به دست آورد. در شکل (17)، تغییرات توان الکتریکی خروجی از سیستم نسبت به تغییر این پارامتر آورده شده است. در این شکل، با افزایش نسبت هوا به سوخت، توان الکتریکی تولیدی در پیل تا حد معینی بیشتر شده و سپس در ادامه سیر نزولی پیدا می‌کند. انتخاب نسبت هوا به سوخت بیشتر باعث کاهش چشمگیر توان الکتریکی در پیل خواهد شد. نتایج به دست آمده بیانگر نسبت هوا به سوخت 8 به عنوان یک نسبت بهینه است.

افزایش مقدار توانایی استفاده از سوخت، توان تولیدی در پیل سوختی را افزایش می‌دهد و سیستم در شدت جریان بالاتری به ناحیه غلظت می‌رسد. همان‌طور که در شکل (18) دیده می‌شود، افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل تا یک حد معین باعث افزایش راندمان الکتریکی آن شده و سپس با افزایش بیشتر این ضریب، راندمان الکتریکی پیل کاهش خواهد یافت. همچنین ضریب بهینه مصرف سوخت در دمای 1273 K در حدود 0/8 به دست آمده است. ذکر این نکته ضروری است که در سایر تحقیقات انجام شده، مقدار این ضریب در محدوده 0/8 تا 0/85 توصیه شده است [13 و 16].



شکل (17): تغییرات توان الکتریکی توده پیل سوختی در نسبت‌های هوا به سوخت مختلف

- با افزایش دما چگالی جریان حدی افزایش می‌یابد و پیل در چگالی جریان‌های بالاتری دچار افزایش افت ولتاژ غلطی می‌شود، لذا بهتر است که چگالی جریان در پیل متناسب با دمای کاری آن انتخاب شود.

- با افزایش دما و فشار کاری پیل، افت ولتاژ کلی کمتر می‌شود و عملکرد آن بهبود می‌یابد. نکته مهم در این بخش، تأثیر بیشتر دما نسبت به فشار کاری پیل است.

- افزایش دمای کاری پیل باعث افزایش راندمان الکتریکی و کاهش راندمان حرارتی در پیل سوختی می‌شود.

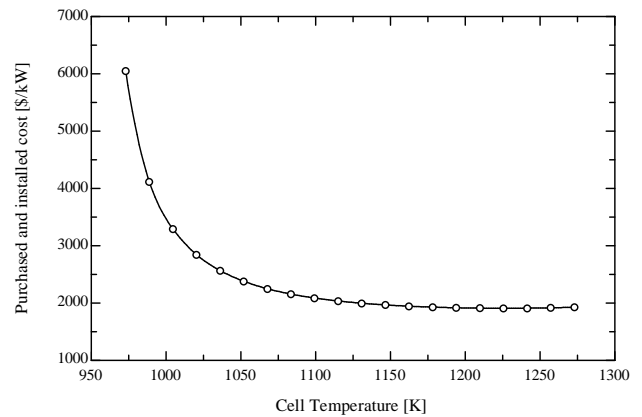
- افزایش فشار کاری پیل تأثیر زیادی بر راندمان الکتریکی آن نداشته و سبب افزایشی در حدود 5 درصد در آن خواهد شد.

- افزایش ضریب مصرف سوخت در پیل تا یک حد معین باعث افزایش توان الکتریکی تولید شده در آن می‌شود و سپس با افزایش بیشتر این ضریب توان الکتریکی پیل کاهش می‌یابد. ضریب بهینه مصرف سوخت پیل سوختی در حدود 0/8 تا 0/85 توصیه می‌شود.

- برای دستیابی به یک راندمان بالا در توده پیل باید نسبت هوا به سوخت ورودی به آن یک مقدار مناسب انتخاب شود. در این مقاله، برای توده پیشنهادی (با در نظر گرفتن حداکثر توان الکتریکی تولیدی)، مقدار نسبت هوا به سوخت برابر 8 پیشنهاد می‌شود.

- نتایج تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهد که با افزایش دمای کاری پیل به دلیل افزایش توان تولیدی سیستم، قیمت برق تولیدی کاهش پیدا خواهد کرد. افزایش دمای پیل از سوی دیگر سبب کاهش هزینه‌های مربوط به خرید، نصب و راه‌اندازی سیستم نیز خواهد شد.

- در دمای 1273 K قیمت برق تولیدی در حدود 14 سنت و هزینه یک مجموعه تولید توان با مولد پیل سوختی در حدود 1900 دلار بر کیلووات برآورد شده است.



شکل (20): تغییرات هزینه خرید، نصب و راه‌اندازی سیستم توده پیل سوختی نسبت به دمای کاری پیل

در جدول (3)، هزینه‌های مربوط به خرید، نصب و راه‌اندازی پیل سوختی اکسید جامد بررسی شده در این تحقیق، با چند نمونه از دیگر سیستم‌های تولید انرژی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هزینه‌های یک واحد تولید توان با پیل سوختی نسبت به سیکل توربین گاز و بخار بالاتر، و در مقایسه با سیستم‌های هسته‌ای و خورشیدی کمتر است. آلاینده‌گی کمتر، راندمان بالا و قیمت برق تولیدی کمتر در طول عمر اقتصادی یک سیستم سبب می‌شود که علی‌رغم قیمت اولیه بالا، پیل سوختی گزینه مناسبی برای جایگزینی سایر سیستم‌های تولید توان گردد.

جدول (3): مقایسه اقتصادی انواع سیستم‌های تولید انرژی

سیستم	راندمان	هزینه خرید، نصب و راه‌اندازی (دلار به کیلووات)
پیل سوختی اکسید جامد	50-60	1500-2000
نیروگاه بخار	25-35	1500
نیروگاه گازی	25-60	250-700
نیروگاه هسته‌ای	35	2000
نیروگاه خورشیدی	10	5000
نیروگاه بادی	75	1500

## 9. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله می‌توان موارد زیر را به عنوان جمع‌بندی بحث ارائه کرد:

- [۱] حسینی، ص و کریمی، غ، بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد لوله‌ای با ریفورمینگ داخلی غیر مستقیم، اولین کنفرانس ملی هیدروژن و پیل سوختی، دانشگاه علم و صنعت، بهمن 1387.
- [۲] غفرانی، م، قنبری باورصاد، پ، خالدی، ه، مدل‌سازی سیکل هیبرید پیل سوختی و توربین‌گاز و بررسی پارامتری مؤلفه‌های مؤثر بر عملکرد آن، پنزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اردیبهشت 1386.
- [3] Williams, M.C., *Fuel cell handbook*, U.S Department of Energy, Virginia, 2002.
- [4] <http://www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells/index.cfm>, Fuel cell related web site of Siemens Westinghouse.
- [5] Bessette, N.F., and Pierre, J.F., "Status of siemens Westinghouse tubular solid oxide fuel cell technology and development program", Proceedings of the 2000 Fuel Cell Seminar, Courtesy Associates, November 2000.
- [6] Chan, S.H., Khor, K.A., and Xia, Z.T., "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness", *Journal of Power Sources*, Vol.93, pp.130-140, 2001.
- [7] Costamagna, P., Selimovic, A., Del Borghi, M. and Agnew, G., "Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell", *Journal of Chemical Engineering Journal*, Vol.102, pp.61-69, 2004.
- [8] Zhang, W., Croiset, E., Douglas, P.L., Fowler, M.W. and Entchev, E., "Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlus unit operation models", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol.46, pp.181-196, 2005.
- [9] Aloui, T. and Halouani, K., "Analytical modeling of polarization in a solid oxide fuel cell using biomass syngas product as fuel", *Journal of Applied Thermal Engineering*, Vol.27, pp.731-737, 2007.
- [10] Campanari, S., "Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module", *Journal of Power Sources*, Vol.92, pp. 26-34, 2001.
- [11] Lazzaretto, A., Toffolo, A., and Zanon, F., "Parameter setting for a tubular SOFC simulation model", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol.126, pp.40-46, ASME, 2004.
- [12] Bharadwaj, A., Archer, D.H. and Rubin, E.S., "Modeling the performance of a tubular solid oxide fuel cell", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Vol.2, pp.38-44, ASME, 2005.
- [13] Volkan Akkaya, A., "Electrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC", *International Journal of Energy Research*, Vol.31, pp.79-98, 2007.
- [14] Mollayi Barzi, Y., Ghassemi, M. and Hamed, M.H., "A 2D transient numerical model combining heat/mass transport effects in a tubular solid oxide fuel cell", *Journal of power sources*, Vol.192, pp.200-207, 2009.
- [15] Bo, C., Yuan, C., Zhao, X., Wu, C. and Qing Li, M., "Parametric analysis of solid oxide fuel cell", *Clean Techn Environ Policy*, Springer-Verlag 2009.
- [16] Chan, S.H., Ho, H.K. and Tian, Y., "Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant", *Journal of Power Sources*, Vol.109, pp.111-120, 2002.
- [17] Ghannadan, M., Ghassemi, M, and Mollayi Barzi, Y., "Performance Analysis of a Tubular Sofc Using a Simple and Efficient Thermal and Electrochemical Model", 18th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2010, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 11-13 May, 2009.
- [۱۸] پیرکندی، ج، بهینه‌سازی ترمودینامیکی و ترموآکونومیکی یک سیکل هیبرید مرکب پیل سوختی دما بالا و توربین‌گاز، رساله دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، 1391.
- [19] Bejan, A., Tsatsaronis, G. and Moran, M., *Thermal design and optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
- [20] Cheddie, D.F., "Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.36, pp.1702-1709, 2011.
- [21] Singhal, S.C., "Advances in solid oxide fuel cells", *Journal of Solid State Ionic*, Vol.135, pp.305-313, 2000.
- [22] Ciesar, J. A, *Hybrid Systems Development by The Siemens Westinghouse Power Corporation*, presented by Siemens Westinghouse Power Corporation, Natural Gas/Renewable Energy Hybrids Workshop, August 2001.