

## بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پیل سوختی غشا پلیمری، با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سمیه احمدی<sup>۱</sup>

پژوهشگر مؤسسه‌ی مطالعات بین‌المللی انرژی sepide.ahmadi2006@gmail.com

وحید فیروزمند

دانشجوی دکتری مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی شریف vahid.frz@gmail.com

امید مهدوی

کارشناس ارشد مهندسی انرژی دانشگاه صنعتی شریف omidmhdv@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۰۹

### چکیده

پیل سوختی، سیستمی الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به‌طور مستقیم و بدون احتراق، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. با توجه به کاربردهای مختلف و بازدهی انرژی بالای پیل‌های سوختی، این سیستم به عنوان یکی از پرفرودارترین سیستم‌های تبدیل انرژی شناخته می‌شود، بنابراین بهینه‌سازی سیستم پیل سوختی با توجه به تقاضای انرژی موجود، یکی از زمینه‌هایی است که مورد توجه و بررسی بسیاری از محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. بدین منظور در این پژوهش یک مدل اقتصادی-عملکردی از سیستم پیل سوختی توسعه داده شده است که در آن، ابتدا مروری پس از معرفی روش شناسی حل مسئله بهینه‌سازی، با استفاده از معادلات معرفی شده در بخش مدل‌سازی سیستم پیل سوختی، مدلی برای هزینه‌ی نهایی یک استک پیل سوختی ۵۰ kW با در نظر گرفتن فشار سیستم، ضریب استوکیومتری هوا و هیدروژن و چگالی جریان و هم‌چنین دمای سیستم به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی توسعه داده شده است. در نهایت با استفاده از یک مدل اقتصادی-عملکردی با توجه به نوع سیستم پیل سوختی مورد نیاز که شامل یک پیل سوختی ۵۰ کیلووات، کمپرسور، مخزن ذخیره‌سازی هیدروژن و سایر اجزا می‌باشد، توسعه داده شده و سپس توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. سپس تحلیل حساسیت بر روی تک‌تک پارامترهای درگیر در مدل انجام گرفته و در رابطه با چگونگی بهبود تابع هدف مدل با تغییر هر یک از آن‌ها بحث و بررسی انجام گرفته است.

طبقه بندی JEL: C39, C61, Q40, L68

کلید واژه: پیل سوختی، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، تحلیل حساسیت، مدل اقتصادی - عملکردی

## ۱- مقدمه

پیل سوختی، سیستمی الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به‌طور مستقیم و بدون احتراق، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. به‌همین دلیل بازدهی الکتریکی بالاتری نسبت به موتورهای حرارتی که به‌وسیله‌ی راندمان چرخه‌ی کارنو محدود می‌شوند، دارد. محصول جانبی انجام واکنش در یک پیل سوختی می‌تواند گرما، آب، دی‌اکسید کربن و هیدروکربن‌ها باشد که وابسته به نوع سوخت ورودی است. صفحات دوقطبی<sup>۱</sup>، لایه‌ی متخلخل نفوذ‌گازی<sup>۲</sup>، لایه‌های کاتالیستی<sup>۳</sup>، الکترولیت، درزبندها<sup>۴</sup> و جمع‌کننده‌های جریان<sup>۵</sup>، اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی پیل سوختی می‌باشند. سوخت و اکسیدکننده از طریق صفحات دوقطبی وارد پیل سوختی شده و پس از عبور از لایه‌های متخلخل‌گازی در لایه‌های کاتالیستی، واکنش اکسایش و کاهش انجام می‌گیرد. یون‌های مبادله شده طی واکنش، از الکترولیت جامد یا مایع و الکترون‌ها از مدار خارجی انتقال می‌یابند. سیستم پیل سوختی، انرژی مورد تقاضا را تا زمانی که سوخت و اکسیدکننده در دسترس باشند، تأمین می‌کند و برای رسیدن به جریان و ولتاژ دلخواه از اتصال سری و یا موازی استفاده می‌شود (احمدی، ۱۳۹۰).

پیل‌های سوختی مزایایی چون پاک بودن، کارکرد بی‌صدا، عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم وجود اجزای متحرک، اتصال به میکروتوربین‌ها را دارا می‌باشد. از میان پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل دمای عملکردی پایین، چگالی جریان عملکردی بالا، وزن پایین و مستعد بودن برای کاهش قیمت از اهمیت زیادی برخوردار بوده و می‌توانند برای کاربردهای حمل و نقلی بیش از سایر انواع پیل سوختی مفید واقع شوند (لارمینی و دیکس<sup>۶</sup>، ۲۰۰۲). پیل سوختی غشا پلیمری یکی از پر کاربردترین پیل‌های سوختی در سطوح مختلف قدرت است که اولین بار به‌منظور استفاده در سفینه‌ی فضایی ناسا طراحی شده است. در این نوع پیل‌های سوختی از نافیون به‌عنوان الکترولیت و از هیدروژن به‌عنوان سوخت استفاده می‌شود. دمای عملکرد آن‌ها حدوداً بین ۷۰-۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است که همین عامل سبب استفاده از کاتالیزورهای گران‌قیمتی هم‌چون پلاتین برای انجام سریع واکنش‌های الکتروشیمیایی

- 1- Bipolar plates
- 2- Gas diffusion layers
- 3- Catalyst layers
- 4- Gaskets
- 5- Collector plates
- 6- Laminie & Dicks

می‌شود. از مهم‌ترین مزایای این نوع پیل‌های سوختی زمان راه‌اندازی پایین، چگالی بالای توان و هم‌چنین دمای عملکردی پایین است. در حالی که الکترولیت آن نسبت به مونوکسید کربن به شدت حساس است و حتی وجود مقدار کمی از آن سبب مسمومیت غشا می‌شود. الکترودها، صفحات دوقطبی، غشا تبادل یونی، صفحات پایانی و واشرها از مهم‌ترین اجزای پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشند (احمدی، ۱۳۹۰).

به تازگی بهینه‌سازی پیل سوختی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و دانشمندان این فناوری قرار گرفته و مدل‌های عملکردی و اقتصادی زیادی بدین منظور تدوین شده‌اند. اولین مدل ریاضی پیل سوختی غشا پلیمری در سال ۱۹۹۲ نوشته شده است که نتایج آن با داده‌های تجربی، هم‌خوانی خوبی دارد (برناردی و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۲). پس از آن بهینه‌سازی این نوع از پیل‌های سوختی انجام شده است که بسیاری از آن‌ها یک تابع هدف را دنبال می‌کنند. برخی دیگر، بهینه‌سازی پیل سوختی با چند تابع هدف انجام شده است. از جمله‌ی این کارها می‌توان به کار زیو و دانگ<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) اشاره کرد که عملکرد و هزینه را به صورت هم‌زمان بهینه کرده‌اند (اگزو، ۱۹۹۸). ضریب استوکیومتری هوا و سطح مقطع فعال پیل دو پارامتری بودند که آن‌ها تابع خود را بر اساس آن نوشتند. پس از آن‌ها وینیک<sup>۳</sup> و همکاران هزینه‌ی پیل سوختی را به صورت مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌ی سوخت مصرف شده‌ی پیل سوختی مدل کرده و با استفاده از مش‌بندی بر روی فضای جواب، مقادیر بهینه پارامترها را برای کمینه‌ی هزینه به دست آوردند (چن و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶). کار بعدی انجام شده در این زمینه توسط گراجیکیک و چیتاجالو<sup>۵</sup> (۲۰۰۴) بوده است که آن‌ها تابع هدف را بیشینه‌ی چگالی جریان قرار داده و با در نظر گرفتن روابط انتقال جرم و انتقال الکترون در آند، کاتد و غشا و لحاظ کردن طول و عرض آن‌ها و هم‌چنین فشار سیستم به‌عنوان پارامترهای مستقل به بهینه‌سازی مدل پرداخته‌اند. تسیوچیا و کوبایاشی<sup>۶</sup> (۲۰۰۴)، توانستند مدلی را برای هزینه‌ی استک پیل سوختی ارائه دهند و آن‌را بهینه کنند. از میان مدل‌های با چند تابع هدف مستقل می‌توان به کار ونکی<sup>۷</sup> (۲۰۰۷) اشاره کرد که

- 
- 1- Bernardi et al
  - 2- Xue & Dong
  - 3- Winnick
  - 4- Chen et al
  - 5- Grujicic & Chittajallu
  - 6- Tsuchiya & Kobayashi
  - 7- Woonki

یکی از توابع هدف آن هزینه و تابع هدف دیگر آن بازدهی استک پیل سوختی بوده است. در این مدل متغیرهای مستقل فشار سیستم پیل سوختی، ضریب استوکيومتری هوا و هیدروژن و هم‌چنین چگالی جریان بوده است. کار دیگر انجام شده در این راستا توسط فرانگوپولوز و ناکوس<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) بوده که از یک استک پیل سوختی به عنوان تأمین‌کننده‌ی تقاضای یک کشتی استفاده کرده، مدل هزینه و عملکردی آن را توسعه و حل کرده اند. پس از آن گروه تحقیقاتی مرت توابع بهینه‌سازی چند هدفه را به‌منظور بهینه‌سازی سیستم پیل سوختی غشا پلیمری ارائه دادند که در آن بازدهی اگسرژ و انرژی سیستم بیشینه و هم‌چنین هزینه‌ی پیل کمینه می‌شد (مرت و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). هم‌چنین در کار پژوهشی دیگری، سیستم پیل سوختی با سوخت زیست‌محیطی مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفته شده و عملکرد آن بهینه‌سازی شده است (اولیوا و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱).

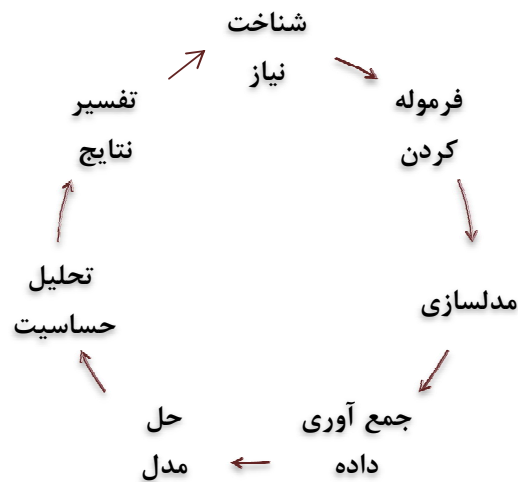
در این مقاله، ابتدا مروری بر روش حل مسائل بهینه‌سازی اقتصادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک خواهیم داشت و پس از معرفی روش‌شناسی حل مسئله بهینه‌سازی، با استفاده از معادلات معرفی شده در بخش مدل‌سازی سیستم پیل سوختی، مدلی برای هزینه‌ی نهایی یک استک پیل سوختی ۵۰ kW با در نظر گرفتن فشار سیستم، ضریب استوکيومتری هوا و هیدروژن و چگالی جریان و هم‌چنین دمای سیستم به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی توسعه داده شده است. در نهایت با استفاده از یک مدل اقتصادی-عملکردی با توجه به نوع سیستم پیل سوختی مورد نیاز که شامل یک پیل سوختی ۵۰ کیلووات، کمپرسور، مخزن ذخیره‌سازی هیدروژن و سایر اجزا می‌باشد توسعه داده شده و سپس توسط الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. در ادامه تحلیل حساسیت بر روی تک‌تک پارامترهای درگیر در مدل انجام گرفته و در رابطه با چگونگی بهبود تابع هدف مدل با تغییر هر یک از آن‌ها بحث و بررسی صورت گرفته است، بنابراین روش انجام پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است.

---

1- Frangopoulos

2- Mert et al

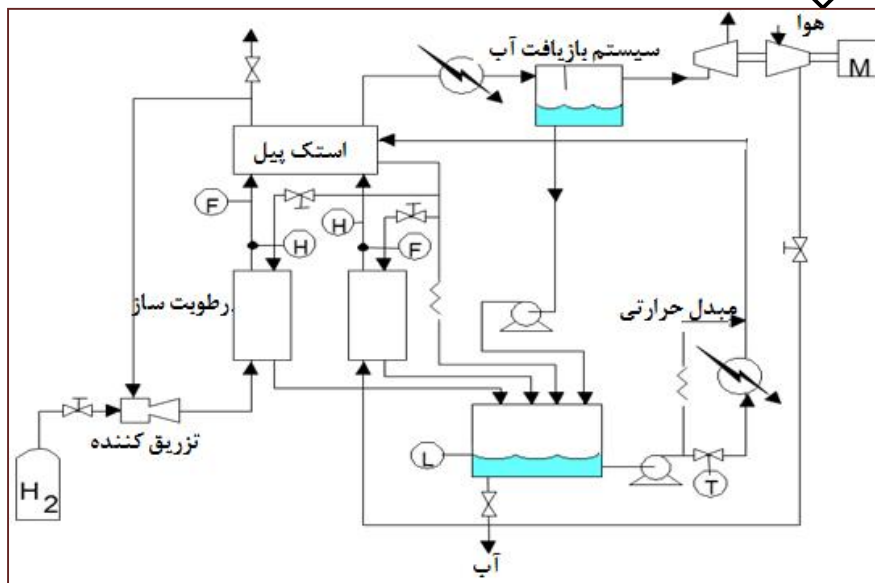
3- Oliva et al



شکل ۱- روند حل مسأله‌ی بهینه‌سازی

## ۲- سیستم مورد مطالعه

همان‌گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم مورد نظر در این پژوهش، استک پیل سوختی با توان ۵۰ کیلووات می‌باشد. این نوع از پیل‌های سوختی کاربرد زیادی داشته و در وسایط نقلیه، تجهیزات نضامی و فضائی، در نیروگاه‌های تولید برق و سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند. هوای ورودی به پیل سوختی از کمپرسور عبور کرده و پس از افزایش فشار وارد استک می‌شود. در این سیستم رطوبت‌سازها، پمپ و وسایل کنترل الکتریسته به عنوان بخش‌های جانبی سیستم در نظر گرفته شده‌اند. هدف از بهینه‌سازی استک پیل سوختی، به دست آوردن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای فشار سیستم، میزان هوا و هیدروژن ورودی به سیستم، دمای عملکردی سیستم و هم‌چنین چگالی جریان عبوری به ازای کم‌ترین هزینه‌ی ممکن برای سیستم می‌باشد.



شکل ۲- شماتیک سیستم پیل سوختی مورد مطالعه

همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده شد، گام بعدی برای حل مسئله، فرموله کردن تابع هدف و مدل‌سازی آن با توجه به پارامترهای تعریف شده می‌باشد. پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و حل مدل، با استفاده از تحلیل حساسیت نتایج به‌دست آمده مورد تحلیل قرار گرفته و در بخش آخر به بحث و بررسی نتایج پرداخته شده است.

### ۳- مدل‌سازی سیستم پیل سوختی

#### توسعه مدل و تعیین تابع هدف

تابع هدف بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه، کمینه کردن کل هزینه‌ها شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ( $C_0$ ) و هزینه‌ی عملکردی ( $C_t$ ) سیستم با در نظر گرفتن نرخ تنزیل ( $in$ ) می‌باشد:

$$C = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + in)^t} \quad (1)$$

هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم استک پیل سوختی در برگیرنده، مخزن ذخیره  $(C_{st})$ ، استک  $(C_{stack})$  و هزینه‌های جانبی  $(C_{BOP})$  می‌باشد که به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$C_0 = C_{BOP} + C_{st} + C_{stack} + C_{fuel} \quad (۲)$$

استک پیل سوختی غشا پلیمری از اجزایی چون غشاهای تبادل یونی، صفحات دوقطبی، الکترودها، صفحات پایانی، واشرها و پیچ‌ها و اتصالات دیگر تشکیل شده است. کاتالیست به کار رفته در استک پلاتین می‌باشد که خود سهم خاصی در هزینه‌ی ساخت استک را دارا است. هزینه‌ی کلی ساخت استک پیل سوختی از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود (دیو کار، ۲۰۰۸ و گراجیکیک، ۲۰۰۴):

$$C_{stack} = \left( \frac{C_m + C_e + C_b + C_{pt} + C_o}{10 \times V_c \times i} + C_a \right) \quad (۳)$$

$$C_{pt} = C_{wpt} * Y_{pt} \quad (۴)$$

که در آن  $C_{stack}$  هزینه‌ی کلی استک  $(\frac{\$}{KW})$ ،  $C_m$  هزینه‌ی غشا  $(\frac{\$}{m^2})$ ،  $C_e$  هزینه‌ی الکتروده  $(\frac{\$}{m^2})$ ،  $C_b$  هزینه‌ی صفحات دوقطبی  $(\frac{\$}{m^2})$ ،  $C_{pt}$  هزینه‌ی پلاتین  $(\frac{\$}{m^2})$ ،  $C_o$  هزینه‌ی بقیه‌ی اجزا شامل واشرها و صفحات پایانی  $(\frac{\$}{m^2})$  و  $C_a$  هزینه‌ی مونتاژ استک  $(\frac{\$}{KW})$  است. هم‌چنین هزینه‌ی کاتالیست به کار رفته در استک بنا بر رابطه‌ی (۴) از حاصلضرب  $C_{wpt}$  هزینه‌ی هر کیلوگرم پلاتین  $(\frac{\$}{kg})$  در  $Y_{pt}$  مقدار کاتالیست به کار رفته  $(\frac{kg}{m^2})$  محاسبه می‌شود. از سویی  $V_c$  ولتاژ پیل (V) و  $i$  چگالی جریان پیل  $(\frac{A}{m^2})$  است. در رابطه‌ی بالا، هزینه‌ی الکترودها، هزینه‌ی صفحات دوقطبی و هزینه‌های جانبی مستقل از چگالی جریان است، این در حالی است که چگالی جریان به میزان کاتالیست به کار رفته و عملکرد غشا وابسته است.

به منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی سوخت، ابتدا فرض می‌شود که تمامی هزینه‌ی ورودی به استک پیل سوختی مصرف شود، بنابراین هزینه‌ی سوخت از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{fuel} = C_f \times \frac{P_{stack}}{\eta LHV_{H_2}} \quad (۵)$$

که در آن  $C_f$  هزینه‌ی هر کیلوگرم هیدروژن  $(\frac{\$}{kg})$ ،  $P$  توان پیل (W)،  $LHV_{H_2}$  ارزش حرارتی هیدروژن  $(\frac{kJ}{kg})$  و  $\eta$  بازدهی استک می‌باشد. لازم به ذکر است که آخرین عبارت در رابطه‌ی بالا نشان‌دهنده میزان هیدروژن مصرف شده می‌باشد.

هزینه‌ی جانبی سیستم (که از آن به هزینه تعادلی نیز یاد می‌شود)، کسری از هزینه‌ی استک و هزینه‌ی ذخیره‌سازی سوخت است (شارخ، ۲۰۰۶ و دیوکار، ۲۰۰۸) و شامل هزینه‌های کمپرسور، رطوب‌ساز، تجهیزات کنترل الکتریکی و سایر وسایل جانبی در سیستم است و بدین صورت تعریف می‌گردد:

$$C_{BOP} = \frac{0.34}{0.66} (C_{st} + C_{stack}) \eta_{fc} \quad (۶)$$

رابطه‌ی ۷، هزینه‌ی عملکردی واحد را نشان می‌دهد و از آن جایی که این هزینه‌ها به‌صورت مداوم با کارکرد سیستم تولید توان طی مدت زمان کارکرد (۹۰ ماه) ایجاد می‌شوند، مطابق رابطه‌ی ۱ باید تعدیل شوند. در این مطالعه، مدت زمان ساخت استک در نظر گرفته نشده و فقط هزینه‌های آن منظور شده است و زمان لحاظ شده نیز زمان عملکرد پیل است.

$$C_t = (1+f)^{t-1} \varphi C_0 + 3.6 \times 10^3 (1-f_f)^{t-1} C_{H_2} \times \frac{t_0 \times \varphi_f \times \lambda_{H_2}}{V_c F} \times \frac{1}{6480} \quad (۷)$$

که  $f$  نرخ تورم،  $f_f$  نرخ تورم سوخت،  $\lambda_{H_2}$  ضریب استوکیومتری هیدروژن و  $t_0$  زمان کارکردی پیل سوختی است.

تمامی هزینه‌های ذکر شده بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت بوده که برای ۹۰ ماه (که مدت زمان عملکردی پیل سوختی است) برگردانده شده است.

همان‌گونه که در معادلات بالا نشان داده شد هم هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و هم هزینه‌ی عملکردی تابعی از راندمان استک می‌باشد. بازدهی سیستم از تقسیم توان خالص خروجی بر توان خالص ورودی به‌دست می‌آید. از آن جایی که در سیستم مورد مطالعه‌ی کمپرسور و سایر دستگاه‌های جانبی از توان این سیستم استفاده می‌کنند، برای به‌دست آوردن میزان خالص خروجی باید توان دستگاه‌های جانبی را از توان حاصل از پیل سوختی کم کرد. ضریب ۱.۲۵ در مخرج نیز ضریبی تجربی است که برای سیستم‌های استک پیل سوختی برای راه‌اندازی سیستم با در نظر گرفتن تجهیزات جانبی در نظر گرفته شده است، بنابراین راندمان استک تابعی از ولتاژ پیل، توان استک، میزان سوخت استوکیومتری و توان وسایل جانبی دیگر است و با توجه به رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود (تسوچیا، ۲۰۰۴ و کانتراس، ۲۰۱۰):

$$\eta_{fc} = - \frac{V_c u_f (P_{stack} - P_{prs})}{1.25 P_{stack}} \quad (۸)$$

که در آن  $P_{stack}$  توان استک پیل سوختی  $P_{prs}(w)$  توان دستگاه‌های جانبی  $(w)$  و  $u_f$  عکس ضریب استوکیومتری هیدروژن است.



برای محاسبه‌ی ولتاژ پیل سوختی، سه افت ولتاژی فعال‌سازی ( $V_{act}$ )، اهمی ( $V_{ohm}$ ) و غلظت ( $V_{con}$ ) در نظر گرفته شده است، بنابراین ولتاژ پیل سوختی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (کاروی، ۲۰۰۹):

$$V_c = E_{ocv} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (9)$$

در یک پیل سوختی همانند هر پیل الکتروشیمیایی دیگر بین آند و کاتد اختلاف پتانسیل وجود دارد. مقدار انرژی الکتروشیمیایی تبدیل شده، برابر تغییر انرژی آزاد ناشی از واکنش شیمیایی است که به‌طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. اختلاف پتانسیل برگشت‌پذیر در پیل سوختی از سه قسمت پتانسیل در شرایط استاندارد، اختلاف پتانسیل به‌دلیل اختلاف دما و اختلاف پتانسیل ناشی از تغییرات غلظت حاصل می‌شود، بنابراین پتانسیل برگشت‌پذیر از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود که در آن ترم اول نشان‌دهنده اختلاف پتانسیل در شرایط استاندارد ( $E_0$ )، ترم دوم نشان‌دهنده اختلاف فشار ناشی از گرادیان دما و ترم سوم ناشی از تغییرات غلظت (معادله‌ی نرنست)، می‌باشد. علاوه بر آن‌ها اختلاف فشار جانبی سیستم نیز به‌منظور دقیق بودن محاسبه‌ی این ولتاژ به معادله اضافه می‌شود که همان ترم چهارم در معادله‌ی ۱۰ می‌باشد، بنابراین ولتاژ مدار باز ( $E_{ocv}$ )، بنابر رابطه‌ی موسوم به معادله‌ی نرنست با توجه به تغییر فشار و تغییر دما بدین صورت تعریف می‌شود (تسوچیا، ۲۰۰۴ و نا، ۲۰۰۸):

$$E_{ocv} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (10)$$

$$E_{ocv} = E_0 - 2.304 \times 10^{-4} (T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \frac{\alpha \beta^{1/2}}{\delta} + \frac{RT}{4F} \ln (P_{sys})$$

$E_0$  پتانسیل عملکردی بهینه برابر ۱/۲۲ ولت،  $T$  دمای عملکردی پیل و  $T_0$  دمای استاندارد ( $^{\circ}C$ ) می‌باشد و فشار هیدروژن، اکسیژن و آب به صورت ضریبی از فشار کل سیستم ( $P_{sys}$ ) به ترتیب با نماد  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  تعریف می‌شود.

پتانسیل فعال‌سازی وابسته به لایه‌ی کاتالیستی است. نحوه‌ی لایه‌نشانی پلاتین و همچنین درست کردن جوهر لایه‌ی کاتالیستی در این جا، مؤثر می‌باشد. این پتانسیل بنابر رابطه‌ی باتلر - والمر، به صورت حاصل جمع پتانسیل آند و کاتد به صورت رابطه‌ی (۱۳) نشان داده می‌شود (احمدی، ۱۳۹۱ و وانکی، ۲۰۰۷):

$$v_{act} = -0.944 + k_{cell}T + 1.97 \times (10)^{-4} T \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} T \ln(C_{H2}) + 7.8 \times 10^{-5} T \ln(C_{O2}) - 1.96 \times 10^{-4} T \ln(iA) \quad (11)$$

که در آن  $A$  مساحت مقطع پیل ( $m^2$ )،  $k_{cell}$  ضریب تجربی و  $i$  چگالی جریان ( $\frac{mA}{cm^2}$ ) است و  $C_{O2}$  و  $C_{H2}$  به ترتیب غلظت هیدروژن و اکسیژن هستند که بنابر رابطه‌ی هنری وابسته به دما می‌باشند:

$$C_{H2} = \frac{\alpha P_{sys}}{1.09 \times 10^6 \exp\left(\frac{77}{T}\right)} \quad (12)$$

$$C_{O2} = \frac{\beta P_{sys}}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad (13)$$

پتانسیل اهمی ناشی از انتقال الکترون و انتقال یون در پیل سوختی است و بنا بر رابطه‌ی تجربی (۱۶) قابل محاسبه خواهد بود (وانکی، ۲۰۰۷):

$$v_{ohm} = -iA(3.3 \times 10^{-3} - 7.55 \times 10^{-6}T + 1.1 \times 10^{-6}iA) \quad (14)$$

آخرین عبارت برای محاسبه‌ی ولتاژ پیل، پتانسیل نفوذی است که از انتقال جرم در سطح پیل ناشی شده و در دمای عملکردی بالاتر از ۳۹ درجه‌ی سانتی‌گراد بنابر رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود که  $n$  بر حسب  $cm^2/A$  و  $m$  بر حسب وات بیان شده است (وانکی، ۲۰۰۷):

$$v_{con} = m \exp(n \times i) \quad (15)$$

که در آن:

$$m = 1.1 \times 10^{-4} \text{ to } 1.2 \times 10^{-6}T \quad (16)$$

$$n = 8 \times 10^{-3}$$

از سویی برای محاسبه‌ی راندمان استک باید علاوه بر مشخص بودن توان استک، توان لوازم جانبی نیز محاسبه شود. همان‌گونه که در رابطه‌ی (۱۸) مشاهده می‌کنید، این توان از دو عبارت توان کمپرسور و توان دستگاه‌های جانبی به دست می‌آید. لازم به ذکر است که توان دیگر لوازم جانبی برای ایجاد توان ۵۰ کیلووات با استفاده از مرجع (وانکی، ۲۰۰۷) برابر ۲/۵ کیلووات تخمین زده می‌شود:

$$P_{com} = C_P \frac{T_e}{\eta_m \eta_{mt}} \left( \left( \frac{P_{sys}}{P_{in}} \right)^{0.26} - 1 \right) \dot{m} \quad (17)$$

$$\dot{m} = 3.57 * 10^{-7} * \lambda_{air} * i * A * N$$

که در آن  $T_e$  دمای هوای ورودی ( $^{\circ}C$ ) و  $P_{in}$  فشار ورودی به سیستم (atm) می‌باشد. یکی دیگر از ترم‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌ی ذخیره‌سازی سوخت است که بنا بر رابطه‌ی (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$C_{st} = \frac{C_s 1}{AFV_c} t \quad (18)$$

که در آن  $C_s$  هزینه‌ی ذخیره‌سازی هر کیلوگرم هیدروژن است که مقدار آن بنا بر میزان هیدروژن ذخیره شده، با تابع زیر تعریف می‌شود و هم‌چنین  $F$  ثابت فاراده،  $A$  مساحت پیل ( $m^2$ )،  $t$  زمان عملکرد پیل (9 mon/year) و  $V_c$  ولتاژ پیل ( $v$ ) می‌باشد.

$$C_s = \begin{cases} 5.244 \frac{\$}{kg} & \text{for } 27,000kg \\ 1.752 \frac{\$}{kg} & \text{for } 276,000kg \\ 1.044 \frac{\$}{kg} & \text{for } 27,600,000kg \end{cases} \quad (19)$$

همان‌گونه که اشاره شد، متغیرهای مستقل مدل عبارتند از دمای عملکردی پیل، فشار سیستم، ضریب استوکیومتری هوا و هیدروژن به‌عنوان ورودی‌های سیستم و هم‌چنین چگالی جریان.

دمای عملکردی سیستم باید به گونه‌ای باشد که هم بخار بودن آب را محفوظ نگه دارد و هم بالا بودن آن سبب پاره شدن غشا نشود. برای این منظور حد بالای آن ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد و حد پایین آن ۶۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. ضریب استوکیومتری هوا و هیدروژن به‌صورت نسبت هر کدام از گازهای ورودی به سیستم به میزان تئوری آن می‌باشد، بنابراین کم‌ترین حد این مقادیر برابر ۱ است. از آنجایی که بالا بودن این مقادیر مقرون به صرفه نمی‌باشد، حد بالای آن، ۳ فرض شده است. فشار سیستم نمی‌تواند کم‌تر از فشار اتمسفر باشد، چرا که کمپرسور قادر به ایجاد چنین فشاری نمی‌باشد، بنابراین حد پایین فشار ۰/۱۲ مگاپاسگال (وانکی، ۲۰۰۷) و حد بالای آن ۰/۴۸ بار در نظر گرفته شده است. حد بالا و پایین چگالی جریان نیز به‌ترتیب برابر ۱ و صفر ( $\frac{mA}{cm^2}$ ) در نظر گرفته می‌شود. حدود ذکر شده در جدول (۱) بیان شده‌اند:

جدول ۱- حدود بالا و پایین پارامترهای بهینه‌سازی

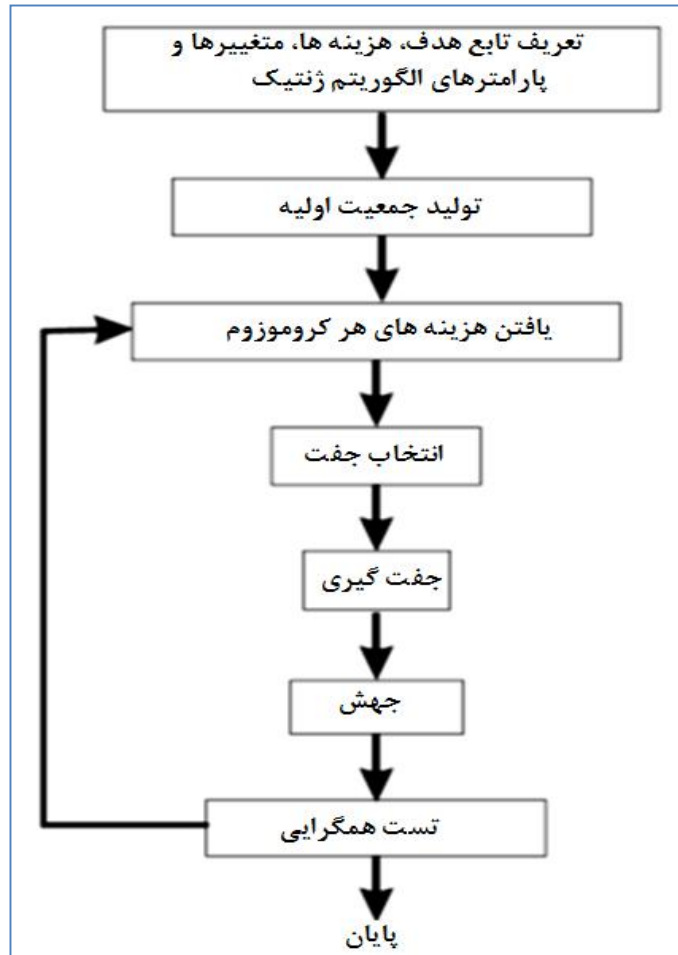
پارامتر	حد پایین	حد بالا
$P_{sys}$	۰/۱۲	۰/۴۸
$\lambda_{H2}$	۱	۳
$\lambda_{air}$	۱	۳
I	۰	۱
T	۶۰	۹۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با توجه به روابط بیان شده در بخش قبل، تابع بهینه‌سازی سیستم در پیوست (۱) گردآوری شده است.

#### بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک

بسیاری از مسایل طراحی بهینه به‌وسیله‌ی ترکیب متغیرهای پیوسته و گسسته و هم‌چنین فضاهای غیرپیوسته و نامحدب مشخص می‌شود. اگر تکنیک‌های برنامه‌ریزی غیرخطی استاندارد برای حل این گونه مسایل به‌کار رود، ناکارآمد و از نظر محاسباتی سنگین خواهد بود. علاوه بر این، این گونه الگوریتم‌ها قادر به پیدا کردن نقاطی در اطراف نقطه‌ی شروع می‌باشند. الگوریتم ژنتیک در حل این گونه مسایل بسیار مؤفق عمل می‌کند و در بیش‌تر مواقع، جواب بهینه را با احتمال مؤفقیته بالایی به‌دست می‌آورد. ساختار کلی الگوریتم ژنتیک در شکل (۳) قابل مشاهده است:



شکل ۳- فلوجارت الگوریتم ژنتیک

بنابر این، الگوریتم ژنتیک از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- ساخت جمعیت اولیه (Initialization)
- ارزیابی تابع هدف (fitness function evaluation)
- انتخاب (selection)
- جفت‌گیری (crossover)

- جهش (mutation)

- جایگزینی (replacement)

اندازه‌ی جمعیت: تعداد افراد اولیه که نسل اول را تشکیل می‌دهند.

تعداد نسل: تعداد نسلی که از جمعیت اولیه تولید می‌شود (از شرایط توقف)

نرخ انتخاب: درصدی از جمعیت که برای جفت‌گیری انتخاب می‌شوند.

نرخ جفت‌گیری: درصدی از جمعیت انتخاب شده که جفت‌گیری می‌کنند.

نرخ جهش: درصدی از فرزندان به وجود آمده که دچار جهش می‌شوند.

در بخش اول جمعیتی متشکل از تعدادی کروموزوم که هرکدام به تعداد متغیرهای مسأله‌ی دارای ژن هستند تشکیل می‌شود. این جمعیت، جمعیت اولیه نام دارد. سپس تعدادی از افراد این جمعیت بعد از گذرکردن از بخش دوم برای جفت‌گیری انتخاب می‌شوند، که این امر در بخش سوم الگوریتم انجام می‌پذیرد. در بخش چهارم افراد انتخاب‌شده دوبه‌دو با هم جفت‌گیری می‌کنند، بدین صورت که تعدادی از ژن‌هایشان را با یکدیگر معاوضه می‌کنند، در این جا ممکن است یک فرد بیش از یک بار و فرد دیگری اصلاً جفت‌گیری نکند که این بستگی به مقدار بهبود آن‌ها در تابع هدف دارد. در بخش بعد چندین ژن از فرزندان به‌دست آمده دچار تغییر در بازه‌ی مجاز خواهند شد. درنهایت، فرزندان جدید نسل جدید را تشکیل خواهند داد و این حلقه ادامه پیدا خواهد کرد تا جایی که یکی از شرایط توقف الگوریتم ارضا شود. این شرایط می‌توانند شامل موارد زیر باشند:

- رسیدن تعداد نسل به تعداد خاصی

- بهبود تابع هدف تا حد خاصی

- عدم تغییر در مقدار تابع هدف بهترین نقطه‌ی فضا در چند نسل اخیر

پارامترهای الگوریتم با توجه به مسایل حل شده‌ی پیشین و تست مکرر الگوریتم

به‌صورت جدول (۲) انتخاب شده‌اند:

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم

اندازه‌ی جمعیت	تعداد نسل	نرخ انتخاب	نرخ جفت‌گیری	نرخ جهش
۲۰	۱۰۰	%۱۰۰	%۹۰	%۱۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

## ۴- نتایج تحقیق

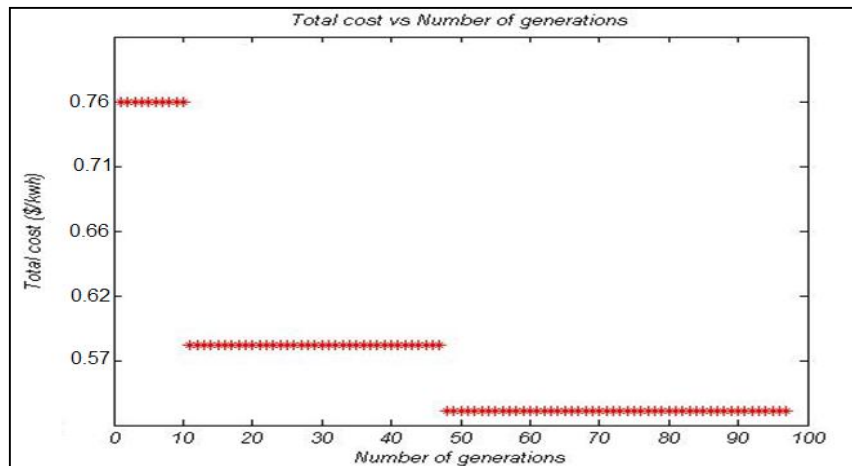
مدل توسعه داده شده با تابع هدف کمینه کردن هزینه‌ی ساخت پیل سوختی توسط الگوریتم ژنتیک حل و مقادیر بهینه برای هر یک از پارامترهای اصلی حاصل شده که در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فشار بهینه‌ی سیستم تقریباً  $0/32$  مگاپاسگال، دمای عملکردی بهینه  $72/41$  درجه‌ی سانتیگراد، چگالی جریان بهینه تقریباً  $0/55$  میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و ضرایب استوکیومتری هیدروژن و هوا در بهترین حالت به ترتیب برابر  $1/2$  و  $1/1$  می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر بهینه برای پارامترهای بهینه‌سازی

پارامتر	$P_{sys}$	$\lambda_{H2}$	$\lambda_{air}$	$i$	$T$
مقدار بهینه	$0/3199$	$1/2018$	$1/1047$	$0/5484$	$72/4149$

مأخذ: یافته‌های تحقیق

مقدار هزینه به ازای مقادیر بهینه  $0/5853$  دلار بر کیلووات ساعت برآورد شده است. نمودار عملکردی الگوریتم در فرآیند بهینه‌سازی به صورت شکل (۴) و نشان‌دهنده‌ی آن است که چگونه با گذشت زمان و تشکیل تعداد نسل جدید بیش‌تر تابع هدف حرکت به سوی کم‌ترین مقدار ممکن می‌باشد.



مأخذ: محاسبات تحقیق

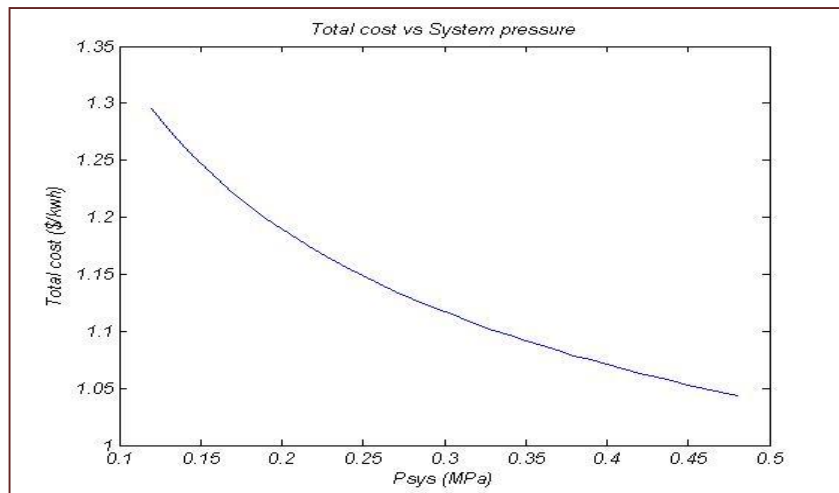
شکل ۴- نمودار تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد نسل

### ۵- تحلیل حساسیت و تفسیر نتایج

انجام تحلیل حساسیت بر روی متغیرهای عملکردی، هر بار مقدار یکی از پارامترها مرتباً تغییر کرده اما مقادیر سایر پارامترها با مقادیر بهینه‌ی حاصل شده که در جدول (۳) آمده، جایگزین شده است.

#### تأثیر تغییرات فشار بر روی هزینه ساخت پیل

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش فشار ورودی به سیستم هزینه‌ی کل کاهش می‌یابد، بنابراین به ازای افزایش فشار تا ۸ بار، هزینه‌ی کل تا ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، اما افزایش فشار سیستم به دلیل ساختار مکانیکی و فیزیکی الکترودها و غشا و هم‌چنین تا حدودی صفحات دوقطبی غیرممکن است، چرا که غشای پیل سوختی تبادل یونی نافیلون می‌باشد که بسیار نازک است و افزایش بیش از حد فشار سبب پاره شدن آن می‌شود. هم‌چنین افزایش فشار سبب می‌شود تا پیوندهای میان کاتالیزور و صفحات انتشار گازی از بین برود، ضمن آن‌که خود صفحات انتشار گازی که عموماً از کربن کاغذی یا پوشش کربنی تشکیل شده است ساختار بسیار شکننده‌ای دارد، بنابراین محدوده‌ی عملکردی برای پیل سوختی باید بسیار آگاهانه و متناسب با شناخت ساختار اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن انجام گیرد.



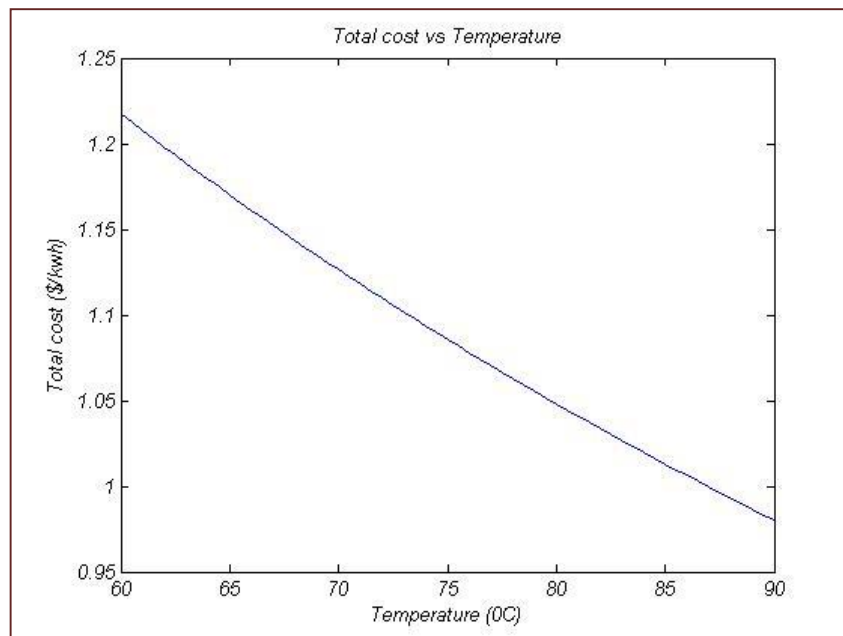
مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۵- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر حسب فشار سیستم



### تأثیر تغییرات دما بر روی هزینه ساخت پیل

با فرض متغیر بودن دمای عملکردی پیل سوختی و ثابت بودن دیگر پارامترهای مدل‌سازی (میزان بهینه‌ی آن‌ها)، هزینه‌ی کل سیستم با افزایش دما، کاهش می‌یابد (شکل ۶). اما ذکر دو نکته لازم است اول این که مقاومت گرمایی نافیون به‌عنوان غشای پیل سوختی عاملی محدود کننده برای افزایش بسیار زیاد دمای عملکردی است و دوم آن که، بهترین حالت برای عبور پروتون‌ها از غشا، زمانی است که آب در دو فاز بخاری و مایع عامل منتقل کننده‌ی آن باشد. در صورتی که دمای عملکردی پیل افزایش یابد، تنها فاز آب در پیل سوختی فاز بخاری است که این موضوع تبادل هیدروژن را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و از این رو، بازدهی سیستم بسیار کاهش می‌یابد، بنابراین در صورتی که تمامی پارامترهای تأثیر گذار در عملکرد پیل سوختی را به‌صورت متغیر در نظر بگیریم، حالت بهینه برای عملکرد آن برابر  $72/42$  درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد. که در این دما حالت آب عبوری از غشا کاملاً دوفازی خواهد بود.

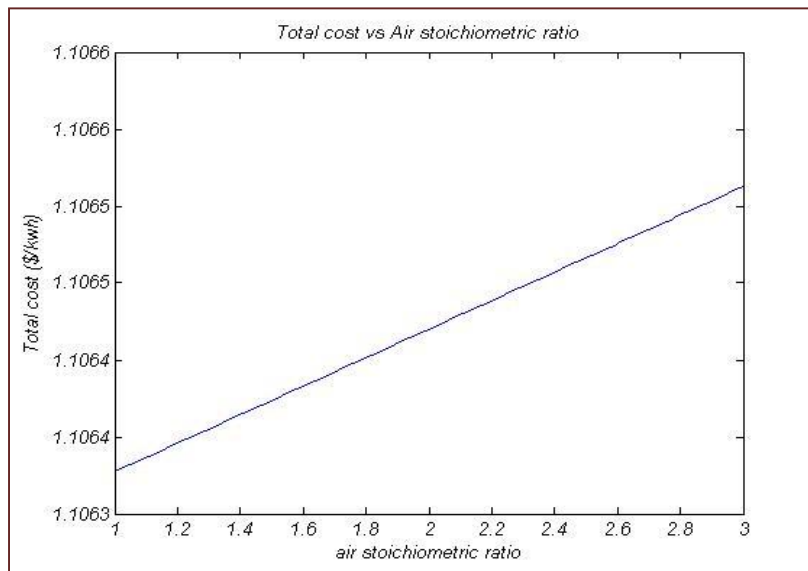


مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۵- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر حسب دمای سیستم

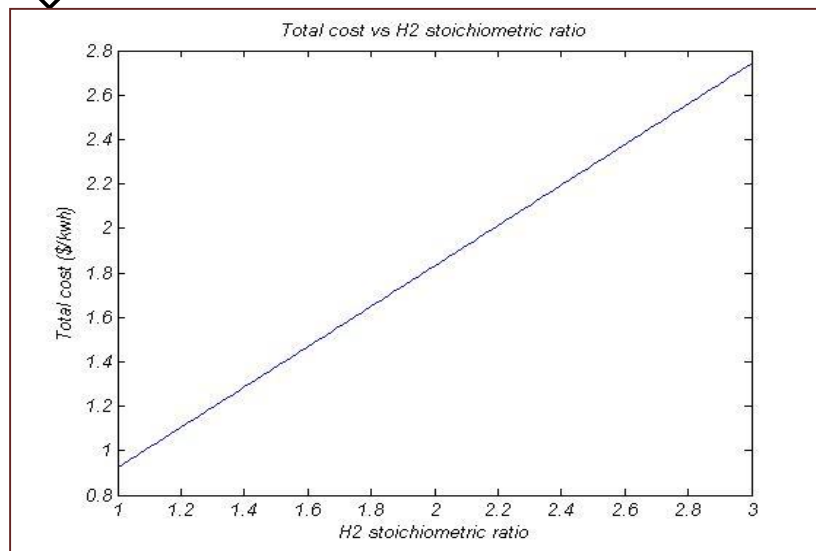
### تأثیر ضرائب استوکیومتری هوا و هیدروژن بر روی هزینه‌ی ساخت پیل

شکل (۷) و (۸) تغییرات هزینه‌ی کل سیستم پیل سوختی را نسبت به تغییرات ضرائب استوکیومتری واکنش دهنده‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هر دو شکل بیان‌کننده‌ی افزایش هزینه‌ها با افزایش نسبت استوکیومتری می‌باشند، اما تفاوت آن‌ها در این است که تغییرات نسبت استوکیومتری هوا اثر کم‌تری نسبت به هیدروژن بر روی هزینه دارد. که این موضوع به دلیل بالا بودن هزینه‌ی ساخت، ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن نیز می‌باشد. بنابراین برای رسیدن به مقادیر بهتر پارامترها می‌توان مقدار آن را زیاده‌تر کرد، البته شایان ذکر است چون افزایش این نسبت با افزایش دبی هوای ورودی به کمپرسور نسبت مستقیم دارد، توان کمپرسور می‌تواند به نوعی عامل محدودکننده برای کاهش هزینه‌ها محسوب شود.



مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۷- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر ضریب استوکیومتری هوا

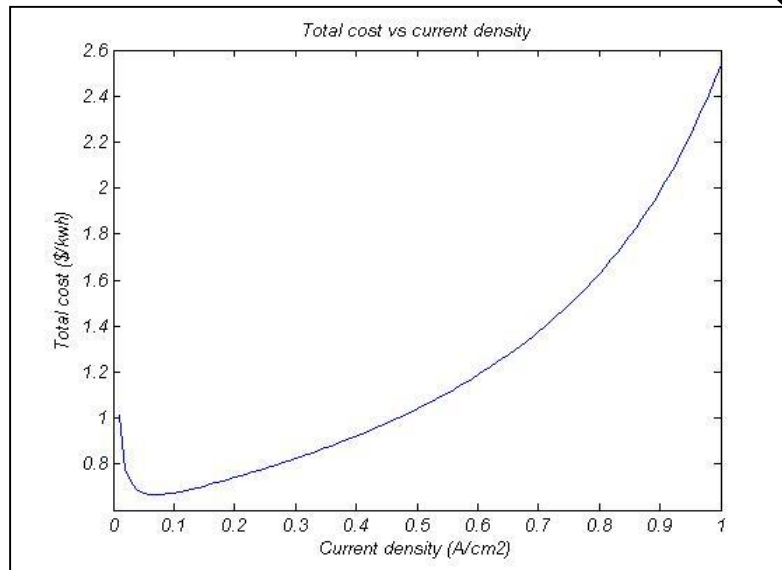


مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۸- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر ضریب استوکیومتری هیدروژن

### تأثیر چگالی جریان بر روی هزینه‌ی ساخت پیل

شکل (۹)، تغییرات هزینه‌ی کل بر حسب تغییرات چگال جریان را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که با توجه به روابط ارائه شده در بخش مدل‌سازی، تغییر چگالی جریان به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نمی‌باشد، اما بررسی‌ها برای یافتن میزان بهینه‌ی قیمت سیستم نسبت به تغییرات پارامتر بیانگر آن است که، با افزایش چگالی جریان در ابتدا هزینه‌ی کل سیستم کاهش یافته و پس از آن با افزایش چگالی جریان هزینه کل نیز افزایش می‌یابد. این امر بدلیل آن است که یکی از مهم‌ترین راه‌های افزایش چگالی جریان متخلخل کردن فصل مشترک غشا - کاتالیست - صفحات انتشار گازی است که این امر با روش‌های به نسبت هزینه بری در هنگام ساخت مجموعه‌ی الکتروود غشا انجام می‌پذیرد، بنابراین میزان بهینه‌ی این پارامتر با توجه به تابع هدف تعریفی برابر  $0/55$  میلی آمپر بر سانتی متر مربع است.



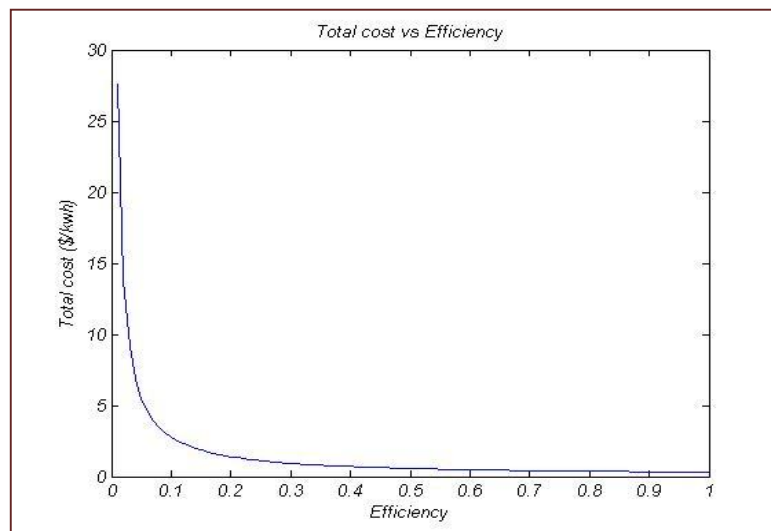
مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۹- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر حسب چگالی جریان

#### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پیل سوختی سیستم الکتروشیمیایی است که هیدروژن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و از آن جایی که دارای مزایای چون پاک بودن، کارکرد بی‌صدا، عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم وجود اجزای متحرک، اتصال به میکروتوربین‌ها می‌باشد در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است. یکی از بزرگ‌ترین عیب‌های این سیستم‌های تبدیل انرژی، هزینه‌ی ساخت و عملکردی آن است، از این رو در پژوهش تلاش شده است تا با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهترین شرایط عملکردی به دست آید تا با توجه به آن هزینه‌ی یک استک ۵۰ کیلوواتی پیل سوختی با سایر وسایل جانبی همانند کمپرسور، رطوبت ساز و ... کمینه شود. در این راستا، مدل عملکردی-اقتصادی برای سیستم مورد مطالعه‌ی توسعه داده شده که در آن تمامی اجزاء سیستم به صورت اقتصادی و هم الکتروشیمیایی- مکانیکی مدل سازی شده است. با حل مدل توسعه داده شده و با در نظر گرفتن تابع هدف (مینیم هزینه سیستم) میزان بهینه‌ی هزینه‌ی سیستم برابر ۰/۵۸۵۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت مشخص شده است. پس از آن تحلیل حساسیتی بر روی پارامترهای عملکردی مذکور انجام شده است. تفسیر این

نتایج بیانگر آن است که با افزایش دما و فشار سیستم هزینه‌ی سیستم کاهش می‌یابد، اما از آن‌جا که ساختار غشا و الکتروده‌های پیل سوختی از نظر مقاومت گرمایی و استحکام مکانیکی باید مورد توجه قرار گیرد، عوامل محدود کننده‌ای برای کنترل آن‌ها و رسیدن به عملکرد بهینه (بازدهی بیش‌تر) وجود دارد که باید در نظر گرفته شود. از سویی افزایش نسبت استوکیومتری هوا و هیدروژن سبب افزایش هزینه‌ی کل سیستم می‌شود که با توجه به شرایط تولید و ذخیره سازی این واکنش دهنده امری منطقی است. هم‌چنین، افزایش چگالی جریان در ابتدا سبب کاهش هزینه‌ها و سپس سبب افزایش آن می‌شود که به دلیل متخلخل کردن لایه‌ی سه گانه‌ی غشا-الکتروکاتالیست - صفحات انتشار گازی است. در مجموع می‌توان با توجه به پارامترهای عملکردی و روابط حاکم بر مدل‌سازی اقتصادی- عملکردی میزان بازدهی سیستم پیل سوختی را محاسبه و روند تغییرات آن را نسبت به هزینه کل سیستم مطابق شکل (۱۰) رسم کرد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش بازدهی سیستم، هزینه‌ی کل سیستم پیل سوختی کاهش می‌یابد، از این رو فشار بهینه‌ی سیستم تقریباً  $0.32$  مگاپاسگال، دمای عملکردی بهینه  $72/41$  درجه‌ی سانتیگراد، چگالی جریان بهینه تقریباً  $0.55$  میلی آمپر بر سانتی متر مربع و ضرایب استوکیومتری هیدروژن و هوا در بهترین حالت به ترتیب برابر  $1/2$  و  $1/1$  حاصل شده است.



مأخذ: محاسبات تحقیق

شکل ۱۰- تغییرات هزینه‌ی نهایی بر حسب توان سیستم

## فهرست منابع

احمدی سمیه، رضائی محمد، روشندل رامین (۱۳۹۱). مدل‌سازی سیستم ترکیبی توربین بادی- پیل سوختی و سهم پیل سوختی در تأمین تقاضای الکتریکی در یک منطقه نمونه‌ی مجله‌ی علمی پژوهشی مدیریت انرژی

"بهینه‌سازی ساخت پیل سوختی غشا پلیمری و نقش آن در عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی- توربین بادی"، سمیه احمدی، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۰

Bernardi, D.M. Verbrugge, M. W. *A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cell*, J. Electrochemical Society, 1992 (139), 2477–2490

Chen, K. I. Winnick, J. Manousiouthakis, V. I. *Global optimization of a simple mathematical model for a proton exchange membrane fuel cell* ,J. Computer and chemical engineering, 30(2006), 1226-1234.

Contreras, A., Posso, F., et al, *Modelling and simulation of the utilization of a PEM fuel cell in the rural sector of Venezuela*, Applied Energy, 87(2010), pp. 1376-1385.

Diwekar, U. "Introduction to Applied Optimization", New York: Springer, 2008.

El-Sharkh, M., Tanrioven, M., et al, *Impact of hydrogen production on optimal economic operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant*, Journal of Power Sources, 153(2006), pp.136-144.

Frangopoulos, Ch. A. Nakos, L. G. *Development of a model for thermo-economic design and operation optimization of a PEM fuel cell system*, J. Energy, 31 (2006), 1501–1519

Grujicic, M. Chittajallu, K.M. *Design and Optimization of Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells* .j. Applied Surface Science, 227 (2004), 56–72

Larminie, J. Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained, Wiley, New York, 2002

Ma, Y., Karady, G. G., et al, *Economic feasibility prediction of the commercial fuel cells*, 50(2009), pp. 422-430

Mert, S. O. Özçelik, Z., Y. Özçelik, I. Dinçer, *Multi-Objective Optimization of a Vehicular PEM Fuel Cell System*, J. Applied Thermal Engineering, 13(2011) 2171–2176.

Na, W. K., (2008), PhD thesis, University of Texas, Arlington

Oliva, D. G., J. A. Francesconi, M. C. Mussati, P. A. Aguirre, *Modeling, synthesis and optimization of heat exchanger networks. Application to fuel processing systems for PEM fuel cells*, International Journal of Hydrogen Energy 36(2011) 9098–9114.

Tsuchiya, H. Kobayashi, O. *Mass Production Cost of PEM Fuel Cell by Learning Curve*, I. J. Hydrogen Energy, 29 (2004), 985 – 990

Woonki, N. Gou, B. *The efficient and economic design of PEM fuel cell systems by multi-objective optimization*, J. Power Sources, 166 (2007), 411–418

Xue, D. Dong, Z. *Optimal Fuel Cell System Design Considering Functional Performance and Production Costs*, J. Power Sources 76 (1998) 69–80

پیوست ۱: تابع بهینه‌سازی و قیود آن

$$\min C = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+in)^t}$$

St.

$$C_0 = C_{BOP} + C_{st} + C_{stack} + C_{fuel}$$

$$C_{stack} = \left( \frac{C_m + C_e + C_b + C_{pt} + C_o}{10 \times V_c \times i} + C_a \right)$$

$$C_{pt} = C_{wpt} * Y_{pt}$$

$$C_{fuel} = c_f \times \frac{P_{stack}}{\eta LHV_{H_2}}$$

$$C_{BOP} = \frac{0.34}{0.66} (C_{st} + C_{stack}) \eta_{fc}$$

$$C_t = (1+f)^{t-1} \varphi C_0 + 3.6 \times 10^3 (1-f_f)^{t-1} C_{H_2} \times \frac{t_0 \times c_f \times \lambda_{H_2}}{V_c F} \times \frac{1}{6480}$$

$$\eta_{fc} = - \frac{V_c u_f (P_{stack} - P_{prs})}{1.25 P_{stack}}$$

$$V_c = E_{ocv} - v_{act} - v_{ohm} - v_{con}$$

$$E_{ocv} = E_0 - 2.304 \times 10^{-4} (T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \frac{\alpha \beta^{1/2}}{\delta} + \frac{RT}{4F} \ln (P_{sys})$$

$$v_{act} = -0.944 + k_{cell} T + 1.97 \times 10^{-4} T \ln(A) + 4.3 \times 10^{-5} T \ln(C_{H_2}) + 7.8 \times 10$$

$$C_{H_2} = \frac{\alpha P_{sys}}{1.09 \times 10^6 \exp\left(\frac{77}{T}\right)}$$

$$C_{O_2} = \frac{\beta P_{sys}}{5.08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)}$$

$$v_{ohm} = -iA(3.3 \times 10^{-3} - 7.55 \times 10^{-6} T + 1.1 \times 10^{-6} iA)$$

$$v_{con} = m \exp(n \times i)$$

$$m = 1.1 \times 10^{-4} \text{ to } 1.2 \times 10^{-6} T$$

$$n = 8 \times 10^{-3}$$

$$P_{prs} = P_{com} + P_{oth}$$

$$P_{com} = C_p \frac{T_e}{\eta_m \eta_{mt}} \left( \left( \frac{P_{sys}}{P_{in}} \right)^{0.26} - 1 \right) \dot{m}$$

$$\dot{m} = 3.57 \times 10^{-7} * \lambda_{air} * i * A * N$$



$$C_{st} = \frac{C_s 1}{AFV_c} t$$

$$C_s = \begin{cases} 5.244 \frac{\$}{\text{kg}} \text{ for } 27,000\text{kg} \\ 1.752 \frac{\$}{\text{kg}} \text{ for } 276,000\text{kg} \\ 1.044 \frac{\$}{\text{kg}} \text{ for } 27,600,000\text{kg} \end{cases}$$

$$0.12 \leq P_{\text{sys}} \leq 0.48$$

$$1 \leq \lambda_{\text{air}} \leq 3$$

$$1 \leq \lambda_{\text{H}_2} \leq 3$$

$$60 \leq T \leq 90$$

$$0 \leq i \leq 1$$