

بررسی اثر تغییر پارامترهای طراحی بر مدل استاتیکی پیل سوختی پلیمری و مقایسه آن با نتایج الگوریتم ژنتیک

محمود سبحانی نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی

جندی شاپور دزفول

mahmodsobhani@yahoo.com

مجتبی یوسفی کیا

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

Mojtaba.yoosefikia@gmail.com

افشین قنبر زاده

استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز

Ghanbarzadeh.A@Scu.ac.ir

چکیده

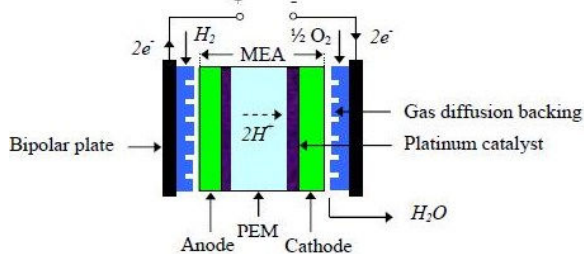
هدف از انجام این مقاله بررسی اثر پارامترهای طراحی پیل سوختی بر ولتاژ و توان خروجی پیل سوختی پلیمری در مدل استاتیکی می باشد. در پیل‌های سوختی شرایط عامل و متغیرهای طراحی نقش مهمی در بهبود عملکرد پیل‌ها دارند. در این کار ما بر روی شبیه سازی عددی اثرات پارامترهای طراحی بویژه درجه حرارت، فشار، سطح مقطع و ضخامت غشاء پیل سوختی تمرکز کرده ایم. در این مطالعه فشار آند و فشار کاتد را به اختصار فشار پیل سوختی می نامیم. در انجام این مقاله دما بین ۲۹۸ تا ۳۵۳ درجه کلون، فشار بین ۱۰ تا ۱۰۲ اتمسفر، سطح مقطع سلول بین ۰۰۱۶ تا ۰۰۵۵ مترمربع در نظر گرفته شده است. نمودارهای ولتاژ-جریان در این مقاله در اثر تغییر پارامترهای مختلف طراحی نمایش داده شده اند. نتایج حاصله در این مطالعه با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آمده اند.

کلمات کلیدی: ولتاژ، توان، پیل سوختی، مدل استاتیکی

مقدمه

رشد روزافزون انرژی در جهان و پایان پذیری منابع انرژی فسیلی از یک سو و آلودگی ناشی از این سوخت‌ها از سوی دیگر باعث شده تا تحقیقات گسترده‌ای در جهان بر روی تکنولوژی‌های نوین تبدیل انرژی انجام گیرد. در این میان دو سیاست عمده همواره مورد نظر بوده است: بهینه سازی سیستم انرژی موجود جهت افزایش بازده و کاهش مصرف انرژی در این سیستم‌ها و دیگری توسعه تکنولوژی‌های جدید و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر. اما آنچه تا کنون عدم استفاده فراگیر از انرژی‌های نو را در پی داشته است غیر اقتصادی بودن این منابع در مقایسه با سوخت‌های متداول است. پیل‌های سوختی به عنوان یکی از فناوری‌های تبدیل انرژی سوخت‌های فسیلی به برق می باشند که به عنوان محصولات جانبی آب و گرما تولید می کنند. این فناوری‌ها به عنوان وسایل تولید انرژی پاک جهت جایگزینی روش‌های متداول مطرح گردیده اند. ولیام گرو اصول تولید نیرو به کمک پیل سوختی را در سال ۱۸۳۹ کشف کرد. تا این اواخر نیز استفاده از پیل‌های سوختی محدود به آزمایشگاه‌ها و صنایع فضایی بود. پیل‌های سوختی از سال ۱۹۶۰ به عنوان فناوری مبدل انرژی با ریسک کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به نمونه‌های دیگر مطرح شدند، که به سرعت به سوی تجاری شدن پیش

میروند. جذابیت اصلی این پیل‌ها تولید انرژی سودمند و پاک در یک مقیاس کوچک تا چند صدکیلو وات است. کاربردهای پیل‌های سوختی بسیار گسترده و متنوع است. امروزه تولید کنندگان عمده اتوموبیل در جهان بر روی تولید، تجاری خودروهایی با پیل سوختی سرمایه گذاریهای کلان نموده اند. زمانی که پارامترهای طراحی کم می باشند استفاده از تکنیک‌های گرافیکی و مطالعات پارامتریک مناسب است اما زمانی که تعداد پارامترها افزایش می یابد عملاً استفاده از این روش‌ها برای به دست آوردن یک طراحی نمونه با استفاده از این فنون غیر ممکن است و روش‌های پیچیده تری برای بهینه سازی مورد نیاز است. بسیاری از نویسندگان و محققین به انجام مطالعاتی در مدل سازی پارامترهای فیزیکی پیل سوختی برای بهبود عملکرد آن‌ها کمک نموده اند [۱]. همچنین پیل‌های سوختی می توانند در حوزه‌های مختلف انرژی الکتریکی نیروگاهی در سطوح مختلف از چند وات تا چند مگاوات مورد استفاده قرار گیرند. این حوزه‌ها عبارتند از: هتل‌ها، مدارس، بیمارستان‌ها، ساختمان‌های اداری و محل‌های خرید. یک پیل سوختی از سه جزء: کاتد، آنود و الکترولیت تشکیل شده است.



شکل ۱- نمای یک سلول سوختی

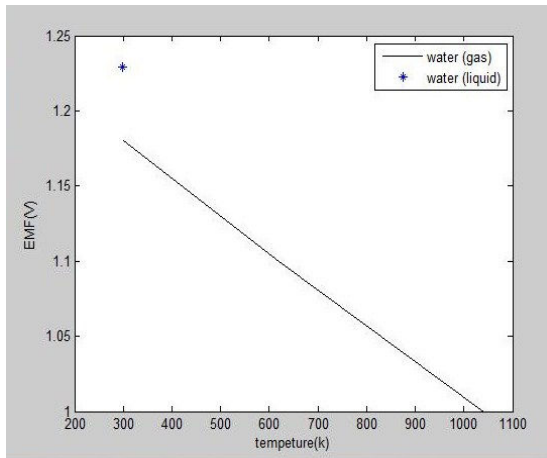
پیل‌های سوختی براساس نوع الکترولیتی که از آن استفاده می کنند تقسیم بندی می شوند. پیل‌های سوختی پلیمری نوعی از پیل‌های سوختی هستند که الکترولیت آن‌ها از یک پلیمر جامد ساخته می شوند. این پیل‌ها در دمای پایین کار می کنند و دارای چگالی قدرت بالاتری نسبت به سایر پیل‌های سوختی می باشند. همچنین زمان راه اندازی این پیل‌ها کوتاه است و همین کوتاه بودن زمان ورود به مدار استفاده از آن‌ها را در مصارف خانگی و خودروهای هیبریدی مقرون به صرفه نموده است. سوخت اصلی یک پیل سوختی هیدروژن است. هیدروژن به سمت آند هدایت می شود و در مجاورت کاتالیز

که در این رابطه مقدار E_{Nernst} عبارت است از [۳ و ۴ و ۵ و ۶]:

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} - 0.85 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298.15) + 4.308 \cdot 10^{-5} T (\ln p_{H_2} + 0.5 \ln p_{O_2}) \quad (2)$$

به عبارت $\frac{\Delta G}{2F}$ پتانسیل برگشت پذیر گفته می شود در عمل بسیاری از باتری های سوختی در درجه حرارت های بالا کار می کنند و در این شرایط آب به صورت گاز خارج می شود نه به صورت مایع و لذا انرژی بیشتری را با خود خارج می سازد. $\frac{\Delta G}{2F}$ را می توان برای محدوده ای از درجه حرارت ها به دست آورد که نشان می دهد با افزایش درجه حرارت پتانسیل برگشت پذیر کم می شود. ΔG اختلاف انرژی آزاد گیبس بین فرآورده ها و واکنش دهنده است.

$$\Delta G = \sum G_{pro} - \sum G_{red} \quad (3)$$

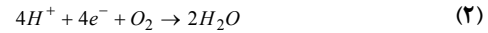


شکل ۳- نمودار تابع پتانسیل برگشت پذیر به صورت تابع درجه حرارت

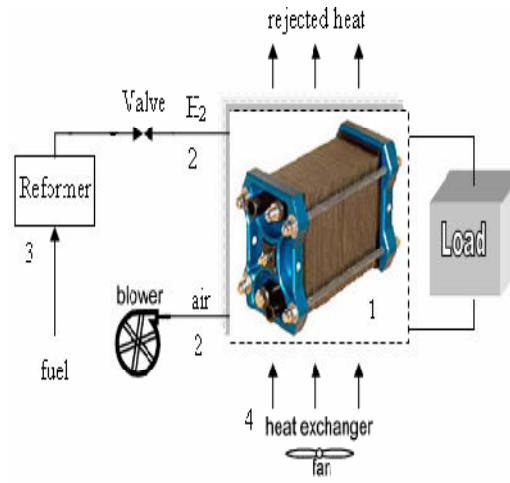
در جدول (۱) انرژی آزاد گیبس در دمای های مختلف و فازهای مختلف آب نمایش داده شده است. اعداد داده شده در جدول با توجه به رابطه زیر به دست آمده اند.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

تجزیه می شود. الکترون های آزاد شده با شارش در مدار خارجی انرژی الکتریکی پیل سوختی را تشکیل می دهند از طرفی دیگر پروتون ها با عبور از الکترولیت به کاتد می رسند. در کاتد اکسیژن به جداره برخورد می کند که نتیجه آن تولید آب است .



طراحی پیل سوختی پلیمری کار ساده ای نیست چون عملکرد آن بستگی به تعداد زیادی از عوامل و پارامترهای طراحی از قبیل درجه حرارت عملیاتی ، فشار ، استکیومتری گازهای واکنش دهنده ، ضخامت غشاء و مساحت سلول با فرایند های الکتروشیمیایی دارد. به منظور به دست آوردن طراحی مطلوب پیل سوختی پلیمری تمام پارامترهای طراحی و عملیاتی باید مورد بررسی قرار گیرند.



شکل ۲- ساختمان کلی یک پیل سوختی

هدف اصلی این مطالعه بررسی عوامل و پارامترهای مهم طراحی به منظور دست یافتن به مدلی بهینه شده می باشد. در این مقاله حداکثر کارایی و نقطه مطلوب برای دست یافتن به ولتاژ خروجی ماکزیمم ارائه شده است. جنبه مهم این مدل این است که هم از نظر فیزیکی و هم از نظر شیمیایی طیف وسیعی از پارامترهای عملیاتی سیستم سلول سوختی را مورد مطالعه قرار داده است . اطلاعات مرجع برای بررسی اثر پارامترهای طراحی پیل سوختی از مطالعات تجربی مورد استفاده قرار گرفته اند. [۷] . نتایج مدل سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB به دست آمده اند.

مدل سازی

ولتاژ خروجی پیل سوختی در منحنی پلاریزاسیون توسط معادله (۱) بیان می شود [۸]:

$$V_{FC} = E_{Nernst} + V_{ohmic} + V_{act} + V_{con} \quad (1)$$

V_{con} نشان دهنده افت ولتاژ به علت کاهش غلظت مواد واکنش دهنده می باشد که به آن تلفات انتقال جرم نیز گفته می شود. برای تعیین معادله افت ولتاژ انتقال جرم یا افت ولتاژ غلظت باید چگالی جریان ماکزیمم ویا چگالی جریان حدی (i_{lim}) تعیین شود. (i_{lim}) چگالی جریانی است که در آن چگالی جریان حداکثر مصرف می شود و به علت آن که سوخت با نرخ بیش تری قادر به مصرف نمی باشد، چگالی جریان سلول هیچ گاه از این مقدار تجاوز نخواهد کرد [۱۰].

$$V_{con} = 0.016 \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{lim}}\right) \quad (۹)$$

فشار جزئی هیدروژن P_{H2} و فشار جزئی اکسیژن P_{O2} و فشار اشباع آب P_{H2O}^{sat} از روابط زیر محاسبه می شوند

$$P_{H2} = 0.5 \cdot P_{H2O}^{sat} \left[\exp\left(-\frac{1.635}{T \cdot 1.334} \cdot \frac{i}{A}\right) \cdot \frac{P_a}{P_{H2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (۱۰)$$

$$P_{O2} = P_{H2O}^{sat} \left[\exp\left(-\frac{4.192}{T \cdot 1.334} \cdot \frac{i}{A}\right) \cdot \frac{P_c}{P_{H2O}^{sat}} - 1 \right] \quad (۱۱)$$

$$\log_{10} P_{H2O}^{sat} = 2.18 + 2.95 \cdot 10^{-2} \cdot T_c - 9.18 \cdot 10^{-5} \cdot T_c^2 + 1.44 \cdot 10^{-7} \cdot T_c^3 \quad (۱۲)$$

ولتاژیک پیل سوختی شامل n سلول سوختی از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_{FC,stack} = n \cdot V_{FC,cell} \quad (۱۳)$$

و توان پیل سوختی از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_{FC} = n \cdot V_{FC,cell} \cdot i_{FC} \quad (۱۴)$$

در شکل زیر نمونه یک ولتاژ خروجی پیل سوختی نشان داده شده است در این شکل به قسمت های مختلف تاثیرگذار در ولتاژ خروجی و همچنین پتانسیل برگشت پذیر اشاره شده است.

جدول ۱- انرژی آزاد گیبس

Form of water product	Temperature °C	Δg_f^0 (kJ/mole)
Liquid	25	-237.2
Liquid	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

V_{ohmic} نشان دهنده افت ولتاژ اهمی است که به سبب مقاومت در برابر حرکت الکترون ها و یون ها ایجاد می شود. از رابطه زیر حساب می شود [۸].

$$V_{ohmic} = i(R^{electronic} + R^{protonic}) = i \cdot R_{int} \quad (۵)$$

$$R_{int} = 1.605 \cdot 10^{-2} - 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 8 \cdot 10^{-5} \cdot i \quad (۶)$$

R_{int} مقاومت داخلی پیل است که از دو نوع مقاومت اصلی به نام مقاومت اهمی و مقاومت فعالسازی تشکیل شده است. مقاومت های مذکور متناسب با دما و جریان پیل تغییر می کنند. $R^{protonic}$ مقاومت مربوط به انتقال یون در الکترولیت بوده و چون مقاومت یونی بزرگتر از مقاومت الکترونیکی است لذا اثر بیشتری در افت ولتاژ دارد. مقاومت فعالسازی به مقاومتی گفته می شود که به عنوان یک سد الکترونیکی در مسیر انجام واکنش رفتار می کند. V_{act} بیان کننده افت ولتاژ فعال سازی در الکترودهای آندو کاتد است. افت ولتاژ فعال سازی به دلیل تندی و کندی واکنش ها روی سطح الکترودها می باشد [۸].

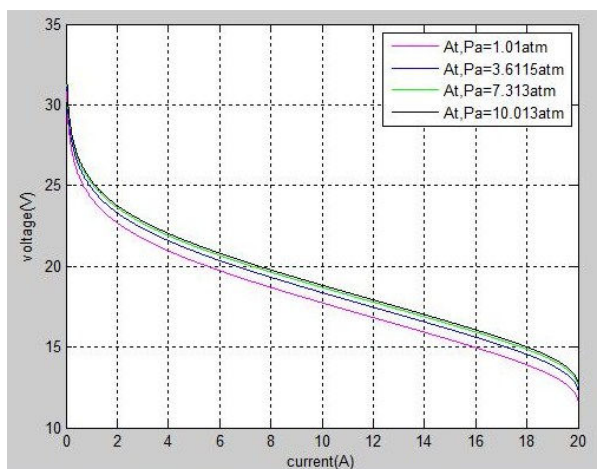
$$V_{act} = -\beta_1 + \beta_2 T - \beta_3 T \ln i + \beta_4 \cdot T \cdot \ln Co_2 \quad (۷)$$

جدول ۲- ضرایب استفاده شده در رابطه (۷)

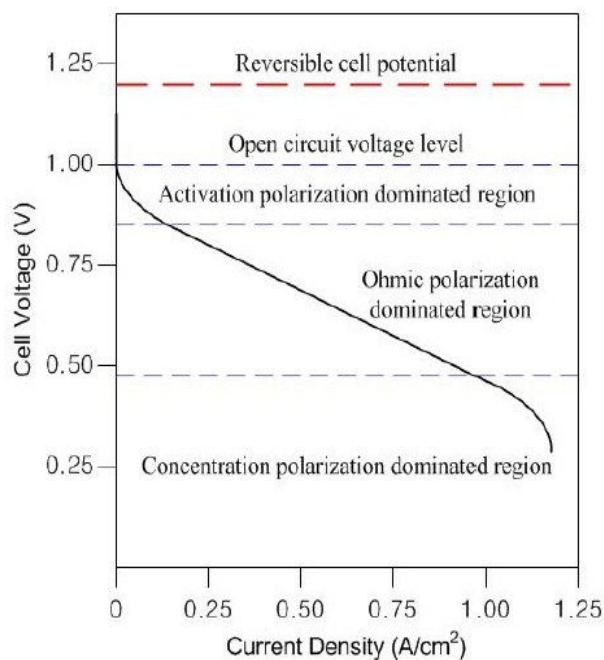
β_1	β_2	β_3	β_4
-0.9514	$3.12 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-4}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$

Co_2 غلظت اکسیژن در سطح کاتالیزور و برحسب $\frac{mol}{cm^3}$ می باشد و از معادله زیر به دست می آید [۹].

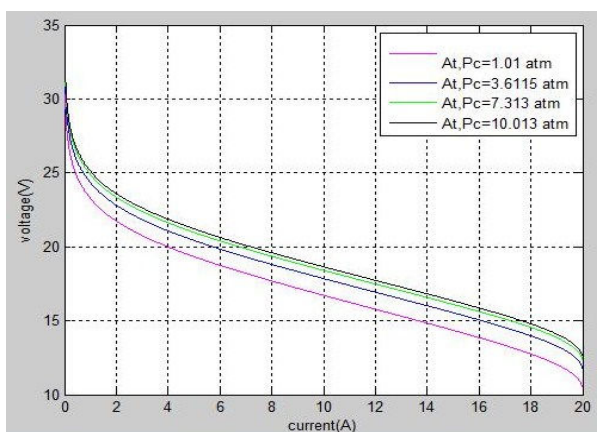
$$Co_2 = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6} \exp\left(\frac{498}{T}\right) \quad (۸)$$



شکل ۶-ولتاژ پیل سوختی بر حسب جریان در فشار آند مختلف

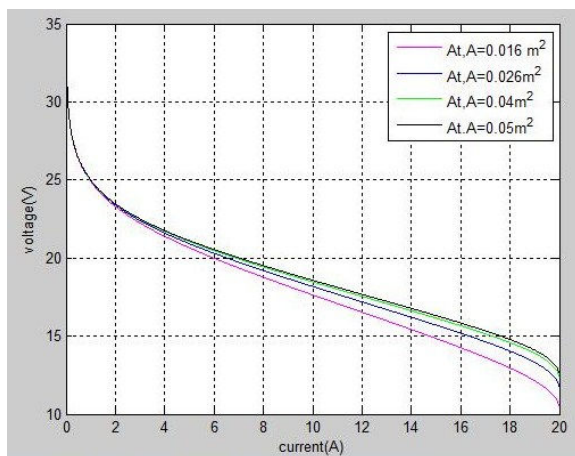


شکل ۴-انواع تلفات ولتاژ در پیل سوختی



شکل ۷-ولتاژ پیل سوختی بر حسب جریان در فشار کاتد مختلف

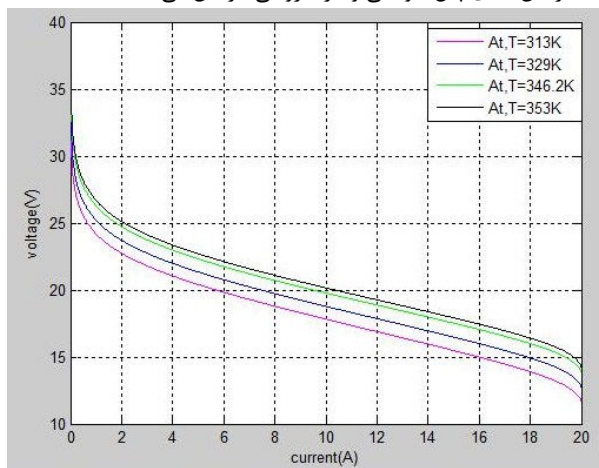
شکل ۸ ولتاژ خروجی پیل سوختی پلیمری را در مدل استاتیکی بر حسب جریان عبوری از پیل در سطح مقطع های مختلف سلول را نشان می دهد. همانطور که مشخص است با افزایش سطح مقطع ولتاژ خروجی افزایش می یابد.



شکل ۸-ولتاژ پیل سوختی بر حسب جریان در سطح مقطع های مختلف

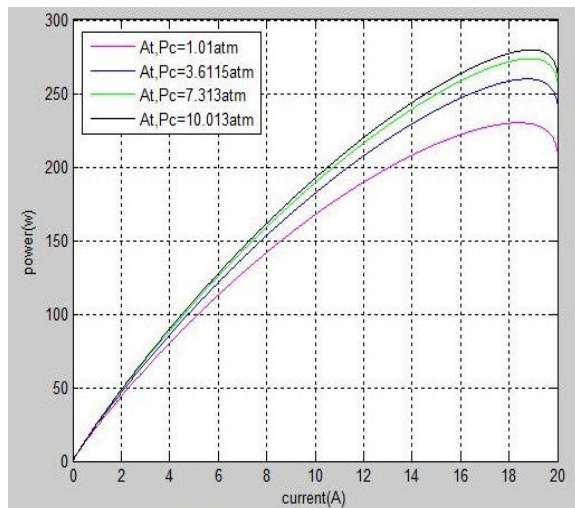
نتایج حاصله از مدل سازی

در شکل ۵ ولتاژ خروجی پیل سوختی بر حسب جریان عبوری از پیل در دماهای مختلف را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود با افزایش دمای پیل سوختی ولتاژ خروجی افزایش می یابد.



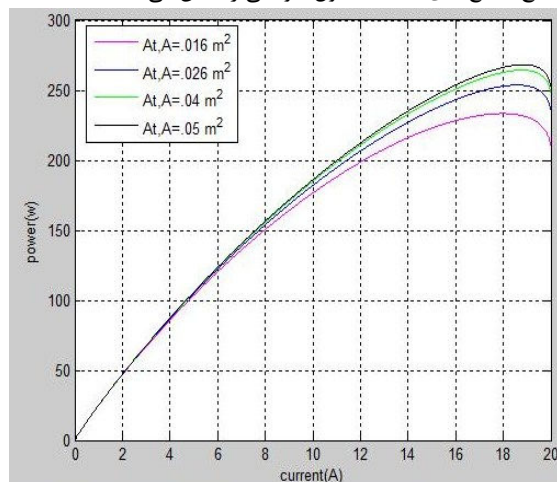
شکل ۵-ولتاژ پیل سوختی بر حسب جریان در دماهای مختلف

در شکل ۶ و ۷ ولتاژ به دست آمده از پیل بر حسب جریان در فشار های مختلف ورود به آند و کاتد نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است با افزایش فشار آند و کاتد ولتاژ خروجی افزایش می یابد. اما با بررسی دو نمودار متوجه می شویم اثر فشار آند بر ولتاژ خروجی از فشار کاتد بیشتر است.



شکل ۱۱- توان پیل سوختی برحسب جریان در فشار های مختلف کاتد

شکل ۱۲- توان خروجی پیل سوختی را برحسب جریان با توجه به سطح مقطع های مختلف سلول سوختی را نشان می دهد.

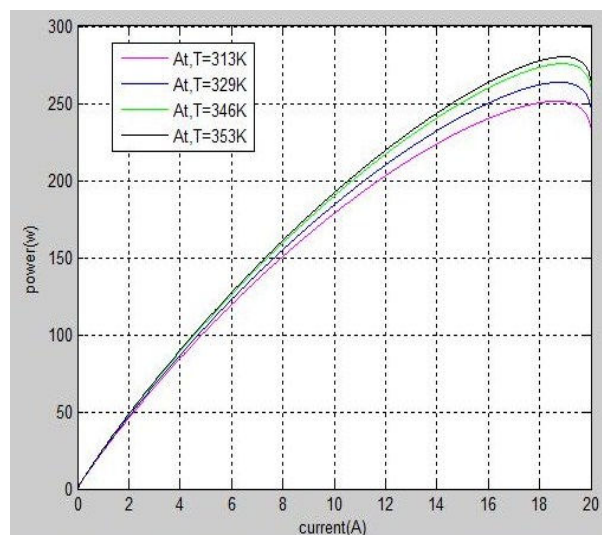


شکل ۱۲- توان پیل سوختی برحسب جریان در سطح مقطع های مختلف

نتیجه گیری

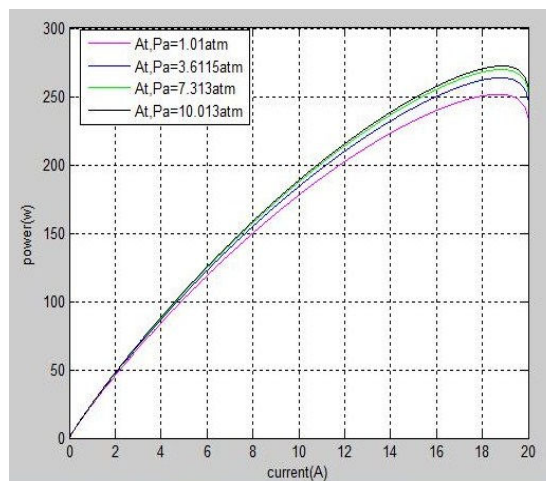
با توجه به این که هدف اصلی این مقاله بررسی اثر پارامترهای طراحی یک پیل سوختی پلیمری در مدل استاتیکی بوده است نمودارهای توان و ولتاژ خروجی پیل سوختی برحسب جریان در دماهای مختلف ، فشارهای مختلف، سطح مقطع های مختلف به دست آمده اند. نتایج حاصله از مدل سازی این نکته را ثابت می کند که با افزایش دما، فشار و سطح مقطع ، ولتاژ و توان خروجی پیل سوختی افزایش می یابد. مقایسه نمودارهای به دست آمده با یکدیگر این نکته ثابت می شود که دمای پیل سوختی بیشترین اثر را در ولتاژ و توان خروجی سیستم دارد. پس از دما فشار آند ، فشار کاتد و سطح مقطع به ترتیب بیشترین اثر را بر روی پیل سوختی می گذارند.

شکل ۹ توان خروجی پیل سوختی پلیمری را برحسب جریان در دما های مختلف نشان می دهد . با توجه به شکل با افزایش دما توان پیل سوختی افزایش می یابد. همان طور که از شکل مشخص است توان پیل سوختی با افزایش جریان افزایش یافته و سپس شروع به نزول می نماید که این نتیجه با کارهای انجام شده آزمایشگاهی مطابقت دارد.



شکل ۹- توان خروجی پیل سوختی در دماهای مختلف

در شکل های ۱۱ و ۱۰ توان خروجی پیل سوختی برحسب جریان در فشارهای مختلف آند و کاتد نمایش داده شده است. با توجه به شکل با افزایش فشار آند و کاتد توان خروجی افزایش می یابد اما در عمل نمی توان فشار آند و کاتد را به هر مقدار دلخواه افزایش داد و از این نظر محدودیت هایی در طراحی سلول سوختی وجود دارد. با مقایسه شکل ۱۱ و ۱۰ به این نتیجه می رسیم که اثر فشار آند بر توان خروجی پیل سوختی بیشتر است.



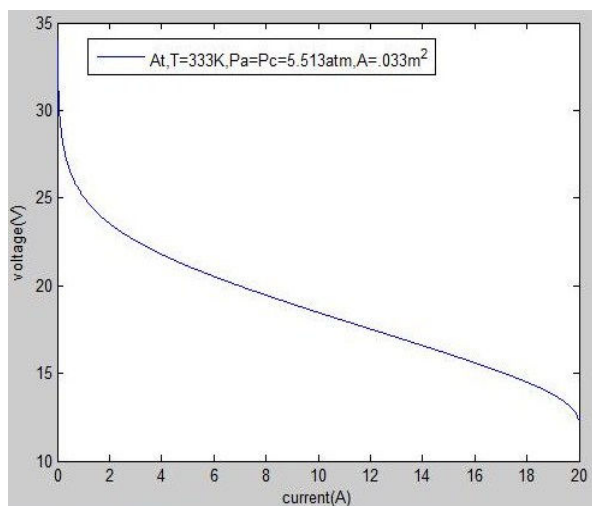
شکل ۱۰- توان پیل سوختی برحسب جریان در فشار های مختلف آند

نتایج به دست آمده در این مقاله در مقایسه با کارهای بهینه سازی انجام شده دارای دقت لازم بوده و در مقایسه با نتایج حاصل از بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک دارای درصد خطای ناچیز می باشد. در جدول ۲ پارامترهای بهینه شده به روش الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است [۷].

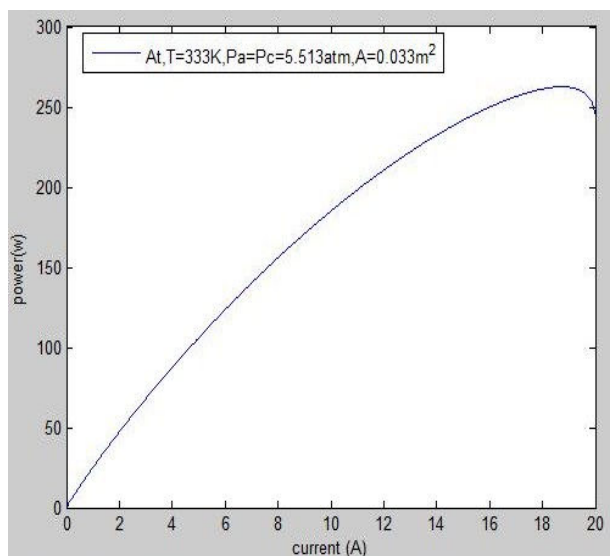
جدول ۲- پارامترهای بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

	MAX LIMIT	MIN LIMIT	Optimum
temperature limits(deg. K)	353	313	338.4671
pressure Limits(bar)	10.013	1.013	5.0718
inlet Current limits(A/m ²)	1	0.1	0.73563
area of Cell(sq. m)	0.05	0.016	0.045464

از آن جا که در طراحی یک پیل سوختی محدودیت های اجرایی از لحاظ دمایی و فشار کاری وغیره وجود دارد ارائه مدلی بهینه با توجه به پارامترهای طراحی قابل اجرا ضروری میباشد. در شکل های ۱۳ و ۱۴ نمودار ولتاژ و توان خروجی پیل سوختی با توجه به پارامترهای بهینه شده ارائه شده اند.



شکل ۱۳- ولتاژ پیل سوختی در حالت بهینه



شکل ۱۴- توان پیل سوختی در حالت بهینه

مراجع

فهرست علائم

[1] Yuyao Shan, Song – Yul Choe, "A high dynamic PEM fuelcell model with different temperature" J. PowerSources 145 (2005) 30-39

[2] M.J. Khan, M.T. Iqbal: "Dynamic modelling and simulation of a fuel cell generator", "Fuel Cells" 2005, 5, No.1, page(s) 97-99, 101-104.

[3] Correa J.M., Farret F.A., Gomes J.R., Simoes M.G., "Simulation of Fuel-Cell Stacks Using a Computer-Controlled Power Rectifier With the Purposes of Actual High-Power Injection Applications", Transactions on Industry Applications, IEEE. Volume 39, Issue 4, July-Aug. 2003 Page(s):1136 – 1142.

[4] Brooks N., Baldwin T., Brinson T., Ordonez J., Luongo C., "Analysis Of Fuel Cell Based Power Systems Using EMTDC Electrical Power Simulator", System Theory, 2004. Proceedings of the *Thirty-Sixth Southeastern Symposium* on 2004 Page(s):270–274.

[5] Wingelaar P.J.H., Duarte J.L., Hendrix M.A.M., "Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cells", *Power Electronics Specialists Conference*, 2005. PESC '05. IEEE 36th 2005 Page(s):1635–1641.

[6] Wingelaar P.J.H., Duarte J.L., Hendrix M.A.M., "Dynamic and static simulation tool for PEM fuel cells", *Industrial Electronics*, 2006 IEEE International Symposium on Volume 3, July 2006 Page(s):1700 – 1705.

[7] Narender Kumar et. al., "Optimization of Proton Exchange Membrane Fuel Cell at Different operating and design Variables Using Genetic Algorithm", *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(11), 2010, 6720-6730

[8] R.F Mann. J.C Amphlett , M.A.I Hooper , H.M Jensen , B.A Peppley , P. R Roberg, "Development and Application of a generalized steady state electrochemical model for a PEM fuel cell", J. Power Sources 86(1/2)(2000) 173-180.

[9] Z. Dong M. Guenther, G. Iuzzolino, "Mathematical modeling of PEM fuel cell and its implementation in MATLAB", Research Report, University of Victoria, 2003.

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
T_c	دمای پیل، C
E	انرژی نرنست، V
F	ثابت فارادی
i	جریان پیل سوختی، A
i_{lim}	ماکزیمم جریان پیل سوختی، A
P_{H_2O}	فشار اشباع آب، atm
P_{H_2}	فشار هیدروژن، atm
P_{O_2}	فشار اکسیژن، atm
n	تعداد سلول های استک
G	انرژی آزاد گیپس، $\frac{kJ}{mole}$

[10] T. Springer, S. Zawodzinski, S. Gottesfeld, "Polymer electrolyte fuel cells", *J. Electrochem. Soc.* 138(8) (1991) 2334-2342.

[11] K. P. Adzakpa, K. Agbossou, Y. Dube, M. Dostie, M. Fournier, A. Poulin. PEM fuel cells modeling and analysis through current and voltage transient behaviors. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2008, 23 (2): 581-591.

[12] Z. D. Zhong, H. B. Huo, X. J. Zhu, G. Y. Cao, R. Yuan. Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants. *Journal of Power Sources* 2008, 176 (1), 259-269