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

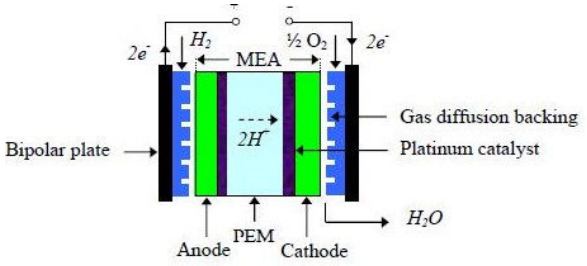
چکیده

هدف از انجام این مقاله بررسی اثر پارامترهای طراحی پیل سوختی بر ولتاژ و توان خروجی پیل سوختی پلیمری در مدل استاتیکی می باشد.درپیلهای سوختی شرایط عامل و متغیر های طراحی نقش مهمی در بهبود عملکرد پیل ها دارند..در این کار ما برروی 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 کلوین،فشار بین ۱.۲تا۱۰ اتمسفر،سطح مقطع سلول بین ۰.۰۱۶تا۰.۰۵ مترمربع در نظر گرفته شده است. نمودارهای ولتاژ–جریان دراین 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 سوخت ها از سوی دیگر باعث شده تا تحقیقات گسترده ای در جهان بر روی تکنولوژی های نوین تبدیل انرژی انجام گیرید.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 سیستم ها و دیگری توسعه تکنولوژی های جدید و استفاده از انرژی های تجدید پذیر.اما آنچه تا کنون عدم استفاده فراگیر از انرژی های نو را در پی داشته است غیر اقتصادی بودن این منابع در مقایسه با سوخت های متداول است.پیل های سوختی به عنوان یکی از فناوری های تبدیل انرژی سوخت های 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 روش های متداول مطرح گردیده اند.ولیام گرو اصول تولید نیرو به کمک پیل سوختی را در سال ۱۸۳۹ کشف کرد.تااین اواخر نیز استفاده از پیل های سوختی محدود به آزمایشگاه ها و صنایع فضایی بود.پیل های سوختی از سال ۱۹۶۰ به عنوان فناوری مبدل انرژی با ریسک کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر نسبت به نمونه های دیگر مطرح شدند،که به سرعت به سوی تجاری شدن پیش میروند.جذابیت اصلی این پیل ها تولید انرژی سودمند وپاک در یک مقیاس کوچک تا چند صدکیلو وات است.کاربردهای پیل های سوختی بسیار گسترده و متنوع است.امروزه تولید کنندگان عمده اتوموبیل در جهان برروی تولید.تجاری خودروهایی با پیل سوختی سرمایه گذاریهای کلان نموده اند. زمانی که پارامترهای طراحی کم می باشند استفاده از تکنیک های گرافیکی و مطالعات پارامتریک مناسب است اما زمانی که تعداد پارامتر ها افزایش می یابد عملا استفاده از این روش ها برای به دست آوردن یک طراحی نمونه با استفاده از این فنون غیر ممکن است و روش های پیچیده تری برای بهینه سازی مورد نیاز است. بسیاری از نویسندگان ومحققین به انجام مطالعاتی در مدل سازی پارامترهای فیزیکی پیل سوختی برای بهبود عملکرد آن ها کمک نموده اند[۱].همچنین پیل های سوختی می توانند در حوزه های مختلف انرژی الکتریکی نیروگاهی در سطوح مختلف از چند وات تا چند مگاوات مورد استفاده قرار گیرند.این حوزه ها عبارتند از: هتل ها،مدارس،بیمارستان ها،ساختمان های اداری و محل های خرید.یک پیل سوختی از سه جزء:آند،کاتدو الکترولیت تشکیل شده است.



شکل ۱- نمای یک سلول سوختی

پیل های سوختی براساس نوع الکترولیتی که از آن استفاده می کنند تقسیم بندی می شوند پیل های سوختی پلیمری نوعی از پیل های سوختی هستند که الکترولیت آن ها از یک پلیمر جامد ساخته می شوند. این پیل ها در دمای پایین کار می کنند و دارای چگالی قدرت بالاتری نسبت به سایر پیل های سوختی می باشند،همچنین زمان راه اندازی این پیل ها کوتاه است و همین کوتاه بودن زمان ورود به مداراستفاده از آن ها 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

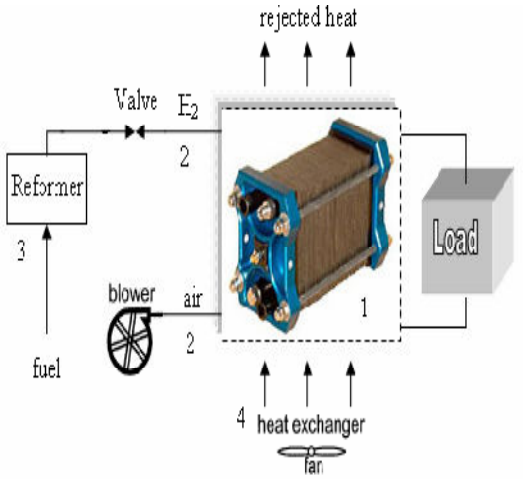
تجزیه می شود.الکترون های آزاد شده با شارش در مدار خارجی انرژی الکتریکی پیل سوختی را تشکیل می دهند از طرفی دیگر پروتون ها با عبور از الکترولیت به کاتد می رسند.در کاتد اکسیژن به جداره برخورد می کند که نتیجه آن تولید آب است .

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (۱)$$

$$4H^+ + 4e^- + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (۲)$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (۳)$$

طراحی پیل سوختی پلیمری کار ساده ای نیست چون عملکرد آن بستگی به تعداد زیادی از عوامل وپارامترهای طراحی از قبیل درجه حرارت عملیاتی ، فشار ،استکیومتری گازهای واکنش دهنده ،ضخامت غشاء ومساحت 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.



شکل۲- 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 ولتاژخروجی 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]:

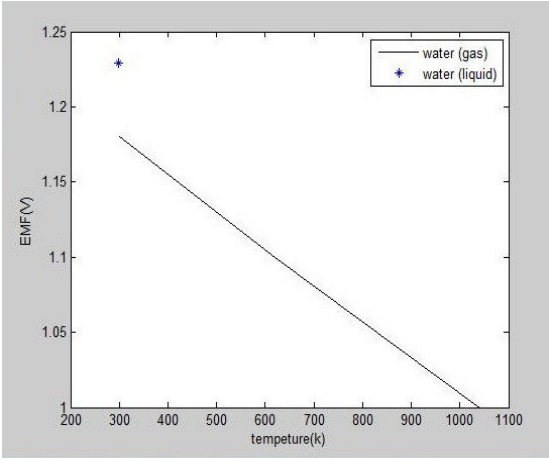
$$V_{FC} = E_{nernst} + V_{ohmic} + V_{act} + V_{con} \quad (۱)$$

که در این رابطه مقدار E_{nernst} عبارت است از[۲و۳و۴و۵و۶]:

$$E_{nernst} = \frac{\Delta G}{2F} - 0.85*10^{-3}*(T-298.15) + 4.308*10^{-5} T(\ln p_{H2} + 0.5 \ln p_{o2}) \quad (۲)$$

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. ΔGاختلاف انرژی آزاد گیبس بین فراورده ها و واکنش دهنده است.

$$\Delta G = \sum G_{pro} - \sum G_{red} \quad (۳)$$



شکل۳-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.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (۴)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

جدول۱-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 دربرابر حرکت الکترون ها و یون ها ایجاد می شودواز رابطه زیر حساب می شود[۸].

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

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

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 وجریان پیل تغییر می کنند. $R^{protonic}$ مقاومت مربوط به انتقال یون در الکترولیت بوده و چون مقاومت یونی بزرگتر از مقاومت الکتریکی است لذا اثر بیشتری در افت ولتاژ دارد. مقاومت فعالسازی به مقاومتی گفته می شود که به عنوان یک سد الکتریکی 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 الکترود ها می باشد[۸].

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

جدول۲-ضرایب استفاده شده در رابطه (۷)

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

Co_2غلظت اکسیژن در سطح کاتالیزور و برحسب $\frac{mol}{cm^3}$ می باشدو از معادله زیر به دست می آید[۹].

$$Co_2 = \frac{P_{o_2}}{5.08*10^6} \exp(\frac{498}{T}) \quad (۸)$$

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 ولتاژغلظت 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] .

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

فشار جزئی هیدروژن P_{H2} و فشار جزئی اکسیژن P_{o2} و فشار اشباع آب P_{H2o}^{sat} از روابط زیر محاسبه می شوند

$$P_{H2} = 0.5 * P_{H2o}^{sat} [\exp(-\frac{1.635\ (\frac{i}{A})}{T^{1.334}})\ \frac{P_a}{P_{H2O}^{sat}} - 1] \quad (۱۰)$$

$$P_{O2} = P_{H2o}^{sat} [\exp(-\frac{4.192(\frac{i}{A})}{T^{1.334}})\ \frac{P_c}{P_{H2O}^{sat}} - 1] \quad (۱۱)$$

$$\log_{10} P_{H2o}^{sat} = 2.18 + 2.95 * 10^{-2} * T_c - 9.18 * 10^{-5} * T_c^2 + 1.44 * 10^{-7} * T_c^3 \quad (۱۲)$$

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

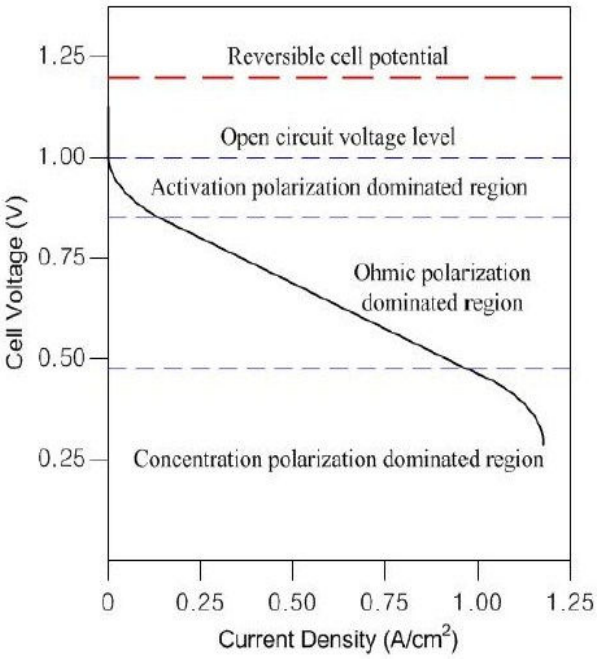
$$V_{FC,stack} = n.V_{FC,cell} \quad (۱۳)$$

وتوان پیل سوختی از رابطه زیر به دست می آید:

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

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.

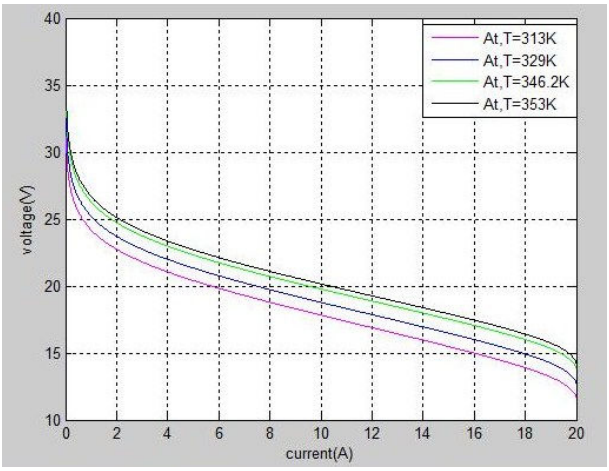
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]



شکل۴-انواع تلفات ولتاژ در پیل سوختی

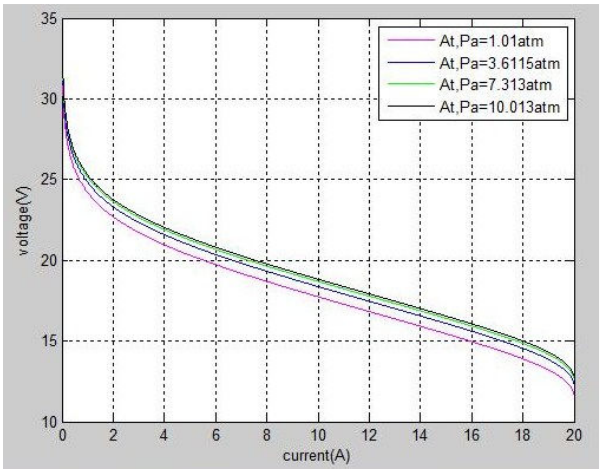
نتایج حاصله از مدل سازی

درشکل ۵ ولتاژخروجی 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.

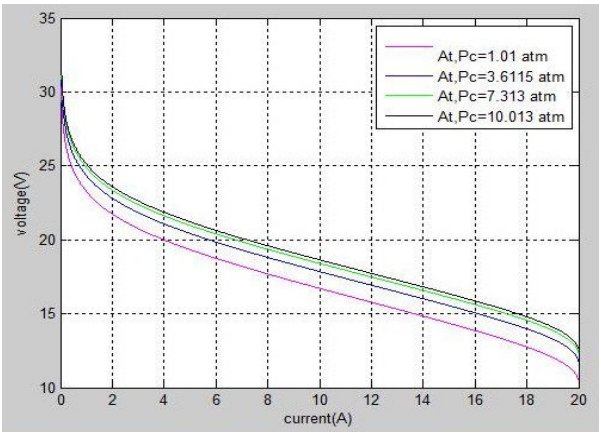


شکل۵- ولتاژپیل سوختی برحسب جریان در دماهای مختلف

در شکل ۶و۷ ولتاژ به دست آمده از پیل برحسب 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.

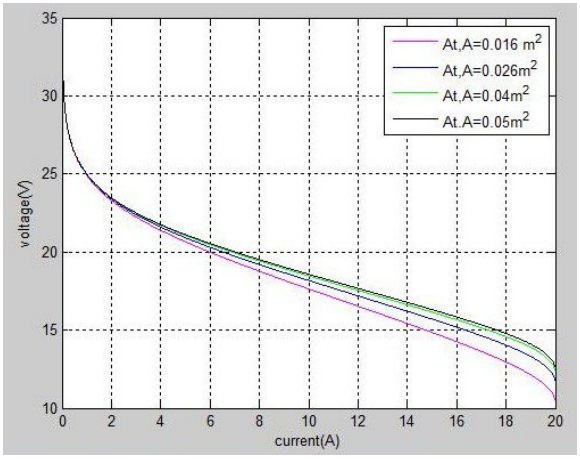


شکل ۶-ولتاژپیل سوختی برحسب جریان در فشار آند مختلف



شکل ۷-ولتاژ پیل سوختی برحسب جریان در فشار کاتد مختلف

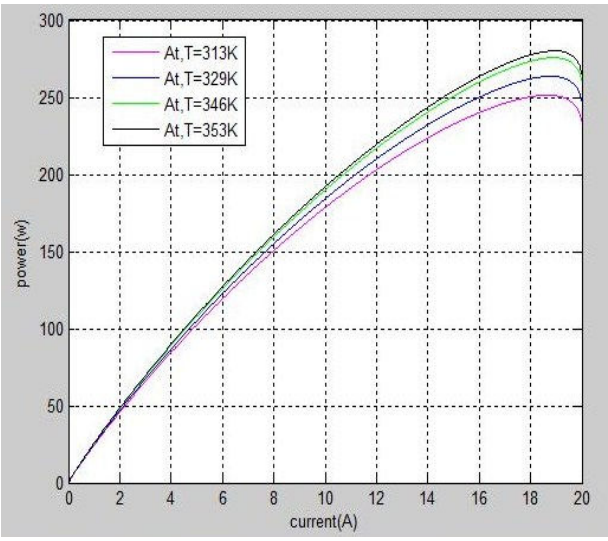
شکل ۸ ولتاژخروجی پیل سوختی پلیمری را در مدل استاتیکی برحسب جریان عبوری از پیل در سطح مقطع های مختلف سلول را نشان می دهد.همانطور که مشخص است با افزایش سطح مقطع ولتاژ خروجی افزایش می یابد.



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

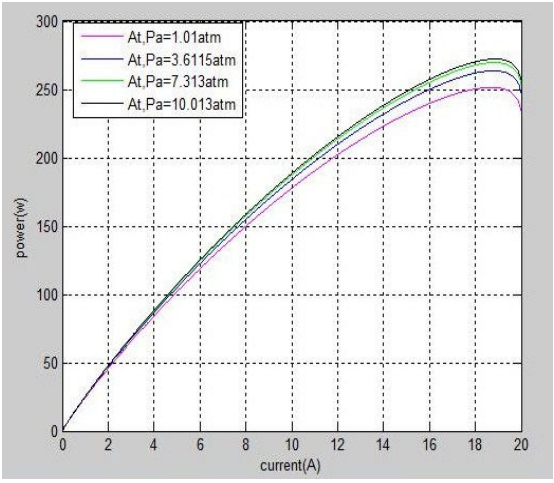
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

شکل ۹ توان خروجی پیل سوختی پلیمری را برحسب جریان دردما های مختلف نشان می دهد . با توجه به شکل با افزایش دما توان پیل سوختی افزایش می یابد. همان‌طور 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.

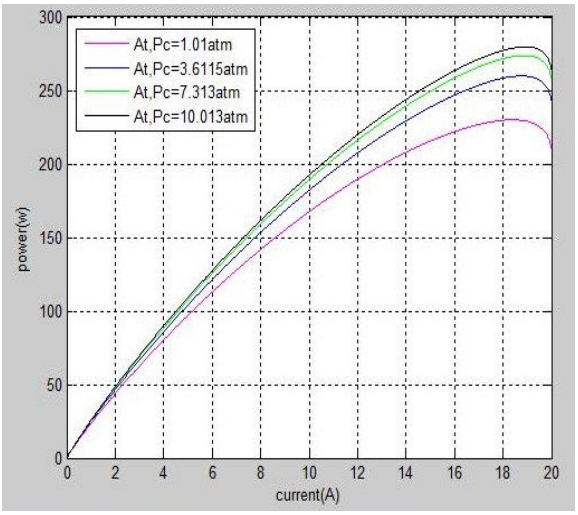


شکل۹-توان خروجی پیل سوختی در دماهای مختلف

در شکل های ۱۰و۱۱ 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 ۱۰و۱۱ به این نتیجه می رسیم که اثر فشار آند بر توان خروجی پیل سوختی بیشتر است.

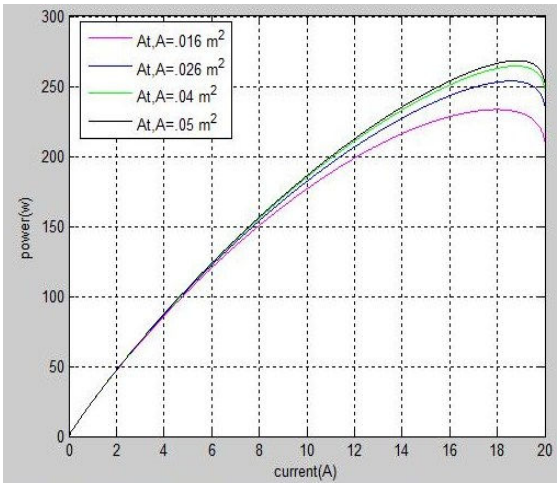


شکل ۱۰- توان پیل سوختی برحسب جریان در فشار های مختلف آند



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

شکل۱۲ توان خروجی پیل سوختی را برحسب جریان با توجه به سطح مقطع های مختلف سلول سوختی را نشان می دهد.



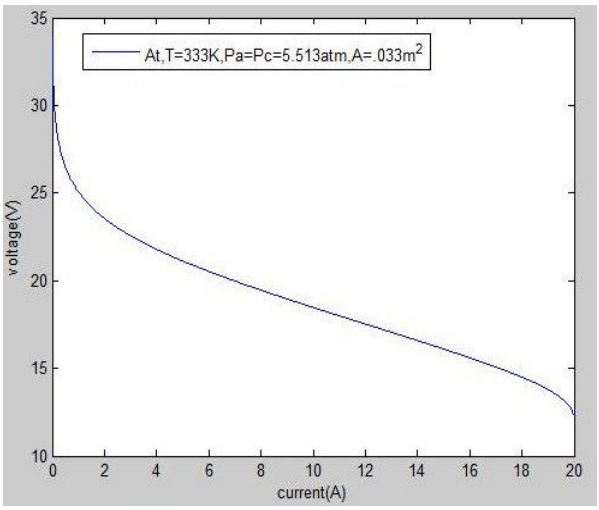
شکل۱۲-توان پیل سوختی برحسب جریان در سطح مقطع های مختلف

نتیجه گیری

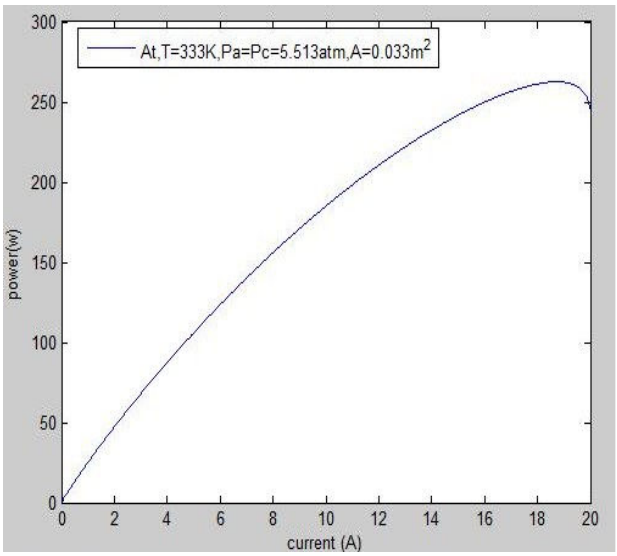
با توجه به این که هدف اصلی این مقاله بررسی اثر پارامترهای طراحی یک پیل سوختی پلیمری در مدل استاتیکی بوده است نمودارهای توان و ولتاژ خروجی پیل سوختی برحسب جریان در دماهای مختلف ، فشارهای مختلف، سطح مقطع های مختلف به دست آمده اند. نتایج حاصله از مدل سازی این نکته را ثابت می کند که با افزایش دما، فشارو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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

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. درشکل های۱۳و۱۴ نمودار ولتاژوتوان خروجی پیل سوختی با توجه به پارامترهای بهینه شده ارائه شده‌اند.



شکل ۱۳-ولتاژ پیل سوختی در حالت بهینه



شکل ۱۴-توان پیل سوختی در حالت بهینه

نتایج به دست آمده در این مقاله در مقایسه با کارهای بهینه سازی انجام شده دارای دقت لازم بوده ودر 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].

جدول۲-پارامترهای بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

	MAX LIMIT	MIN LIMIT	Optimum
mperature mits(deg. K)	353	313	338.4671
ure Limits(bar)	10.013	1.013	5.0718
ad Current mits(Amp.)	1	0.1	0.73563
of Cell(sq. m)	0.05	0.016	0.045464

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
مساحت،m^2	A
دمای پیل، C	T_c
انرژی نرنست،V	E
ثابت فارادی	F
جریان پیل سوختی،A	i
ماکزیمم جریان پیل سوختی،A	$i_{\lim}$
فشار اشباع آب،atm	P_{H2O}
فشارهیدرروژن ،atm	P_{H2}
فشار اکسیژن،atm	P_{O2}
تعداد سلول های استک	n
انرژی آزاد گیپس، $kj/mole$	G

مراجع

[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 ExchangeMembrane Fuel Cell at Different operating and design Variables UsingGenetic 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", ResearchReport, University of Victoria, 2003.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]

[10] T. Springer, S. Zawodzinkshi, S. Gottesfeld, Polymer electrolyte fuel cells", J. Electro Chem. ociety 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 andvoltage transientbehaviors. IEEE Transactions on Energy Conversion2008, 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1389.1.2.7.8]