



مطالعه میزان و چگونگی افزایش بازده سیستم پیل سوختی غشا پلیمری در نتیجه استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت

محسن دادور¹، ابراهیم افشاری^{2*}، علیرضا خادم الحسینی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

2- استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

3- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، e.afshari@eng.ui.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، مطالعه‌ای بر بازده سیستم پیل سوختی غشا پلیمری با استفاده از اجکتور برای بازگرداندن سوخت اضافی در مدار تغذیه سوخت آند و مقایسه با سیستم‌های رایج که عموماً از کمپرسور برای این کار استفاده می‌کنند، انجام شده است. بدین منظور یک مدل نیمه تحلیلی توسعه یافته برای محاسبه میزان افزایش بازده و همچنین میزان ذخیره توان در نتیجه استفاده از اجکتور و حذف کمپرسور در خط برگشت سوخت با گسترش مدل‌های قبلی ارائه شده است. در مدل گسترش یافته با ارائه یک پارامتر بی‌بعد و جدید، پارامترهای مهم هندسی توده پیل سوختی به پارامترهای هندسی اجکتور ربط داده شده‌اند. نتایج به دست آمده برای یک نمونه پیل نشان می‌دهد که میزان افزایش بازده در مقادیر مختلف چگالی جریان، متفاوت است و یک نقطه ماکزیمم برای آن وجود دارد. میزان ذخیره‌ی توان در نتیجه‌ی استفاده از اجکتور در مقایسه با توان توده پیل قابل توجه بوده و با افزایش چگالی جریان، افزایش می‌یابد. این نتایج کاربرد اجکتور را برای مواردی که نیاز به توان بالاتر وجود دارد از جمله کاربردهای حمل و نقل که در آنها سیستم پیل سوختی معمولاً در ماکزیمم توان خود کار می‌کند، به صرفه‌تر نشان می‌دهد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 اردیبهشت 1393
پذیرش: 22 تیر 1393
ارائه در سایت: 12 مهر 1393
کلید واژگان:
پیل سوختی غشا پلیمری
اجکتور
بازده سیستم
خط برگشت سوخت
مدل نیمه تحلیلی

Studying the amount and how to increase the efficiency of the PEM fuel cell system as a result of employing ejector in fuel supply circuit

Mohsen Dadvar¹, Ebrahim Afshari^{1*}, Alireza Khademolhosseini²

1- Department of Mechanical Engineering, Esfahan University, Esfahan, Iran.

2- Department of Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, e.afshari@eng.ui.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 May 2014
Accepted 13 July 2014
Available Online 04 October 2014

Keywords:
PEM Fuel Cell
Ejector
System Efficiency
Fuel Return Line
Semi-Analytical Model

ABSTRACT

In this paper, the efficiency of PEM fuel cell system by using ejector for returning the additional fuel in the fuel supply circuit and comparison with conventional systems with compressor in fuel supply circuit, are studied. For this purpose a semi-analytical developed model for calculating the amount of efficiency increment, as well as the amount of power saving as a result of employing ejector in the fuel cell return line is provided by extending the previous models. In this developed model the important stack design parameters and ejector design parameters are correlated by presenting a new dimensionless parameter. The results for a typical fuel cell show that the amount of efficiency increment at different values of current density is different and there is a maximum point for it. The amount of power saving as a result of employing ejector compared with fuel cell power is considerable and will increase with increasing the current density. These results indicate that the ejector for those applications that require high power (for instance the transport applications) is more efficient.

1- مقدمه

بالا، زمان راه اندازی کم، تولید آلاینده‌ی بسیار ناچیز و در حد صفر، نداشتن قطعه متحرک و در نتیجه‌ی آن نداشتن خرابی زیاد و نیاز به تعمیر بسیار کم را نام برد.

معمولاً در پیل‌های سوختی برای بالا بردن کارایی سیستم از نسبت استوکیومتری بالاتر از یک در سمت آند (سوخت) و همچنین در سمت کاتد (اکسید کننده) استفاده می‌شود. برای بازگرداندن دوباره هیدروژن اضافی و مصرف نشده به چرخه‌ی سوخت دو روش وجود دارد.

پیل‌های سوختی نوعی منبع تأمین انرژی الکتریکی هستند که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. پیل سوختی غشا پلیمری نوعی از پیل‌های سوختی است که به دلیل ویژگی‌های بارزی نظیر دمای عملکرد پایین و چگالی توان بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از دیگر ویژگی‌های این پیل که آن را یکی از امید بخش‌ترین گزینه‌های جایگزین برای موتورهای احتراق داخلی کرده است، می‌توان بازده

Please cite this article using:

M. Dadvar, E. Afshari, A.R. Khademolhosseini, Studying the amount and how to increase the efficiency of the PEM fuel cell system as a result of employing ejector in fuel supply circuit, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 59-66, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

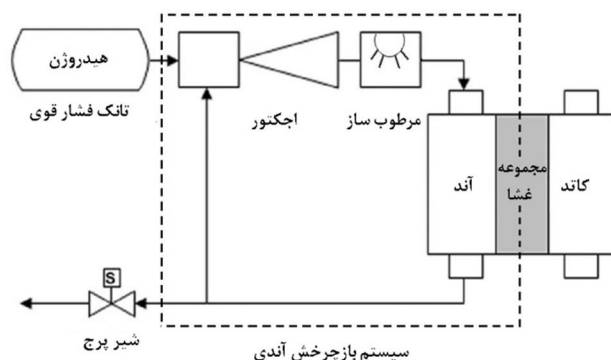
سوخت رسانی آند پیل سوختی غشا پلیمری را با استفاده از مدل یک بعدی و فرض ناحیه اختلاط ثابت مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه با استفاده از یک سیستم کنترلی، سوخت تحویلی به آند کنترل شده است. هی و همکاران [5] سیستم تحویلی سوخت در پیل سوختی غشا پلیمری که شامل دو خط جریان بازگشتی به آند و دو منبع تأمین است را بررسی کرده‌اند. فرضیات استفاده شده بر اساس مدل یک بعدی، اختلاط فشار ثابت و عملکرد اجکتور در حالت بحرانی است. در این مطالعه از یک اجکتور و یک دمنده برای بازگرداندن سوخت مصرف نشده، در سمت آند پیل سوختی استفاده شده است. استوکیومتری سمت آند و همچنین اختلاف فشار بین آند و کاتد، توسط شیر کنترلی قبل از اجکتور و دمنده کنترل شده است. ژو و لی [6] عملکرد اجکتور سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری را در شرایط عملیاتی بحرانی و زیر بحرانی تحلیل کرده‌اند. تحقیق آنها بر پایه مدل دو بعدی برای پروفیل سرعت در ناحیه اختلاط بوده است و ارزیابی دقیق‌تری بر عملکرد اجکتور نسبت به مدل‌های یک بعدی مرسوم انجام داده‌اند. کوندن و همکاران [7] یک سیستم پیل سوختی غشا پلیمری با اجکتور در مدار تغذیه سوخت را برای کاربردهای حمل و نقل بررسی کرده‌اند. در این مقاله عملکرد تمام اجزای سیستم پیل سوختی شبیه‌سازی آزمایشگاهی شده و راندمان سیستم و همچنین افت‌ها در سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه آنها هیچ بررسی ویژه‌ای بر روی اجکتور و تأثیر آن بر کل سیستم انجام نشده است.

در مطالعات پیشین، نتایج عموماً شامل بررسی پارامترهای اجکتور مانند نسبت بازچرخش² بوده است که مهمترین پارامتر اجکتور به حساب می‌آید و به پارامتر یا ویژگی سیستم پیل سوختی همراه با اجکتور پرداخته نشده است. حتی در بهترین حالت مقدار استوکیومتری در سیستم ارائه شده که دید دقیقی از تأثیر اجکتور بر سیستم و کاهش توان کل سیستم در اختیار ما نمی‌گذارد. مدل توسعه داده شده در مقاله حاضر مشخصاً پارامترهای سیستم پیل سوختی و تأثیر استفاده از اجکتور بر آنها و بر کل سیستم را مورد بررسی قرار می‌دهد.

در این مقاله، تأثیر کاربرد اجکتور بر بازده پیل سوختی غشا پلیمری و میزان افزایش بازده کل سیستم با استفاده از یک مدل نیمه تحلیلی توسعه داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا روابطی تحلیلی برای محاسبه میزان افزایش بازده و ذخیره توان همچنین رابطه‌ی صریحی برای محاسبه مستقیم فشار اولیه مورد نیاز پیل در شرایط مختلف عملکردی ارائه شده است که در نوع خود روابط جدیدی هستند که به منظور گسترش مدل به مدل‌های قبلی افزوده شده‌اند. مدل حاضر از دو زیر مدل شامل: زیر مدل اجکتور و زیر مدل توان تشکیل شده است. در زیرمدل اول به بررسی تأثیر اجکتور بر مدار تغذیه سوخت و محاسبه استوکیومتری هیدروژن پرداخته شده است. سپس در زیر مدل دوم میزان افزایش بازده و ذخیره توان در نتیجه استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت، با تکمیل مدل GSSEM و همچنین استفاده از نتایج زیر مدل اول، محاسبه شده است.

2- اجکتور در سیستم تغذیه سوخت پیل

اجکتور مورد مطالعه در این مدل، یک اجکتور نازل همگراست. استفاده از این نوع اجکتور در سیستم تغذیه سوخت پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل کاهش چگالش بخار آب خروجی از آند در داخل اجکتور، مناسب‌تر از نوع نازل همگرا – واگرا است [6]. نمایی از این اجکتور در شکل 2 نمایش داده شده است.



شکل 1 سیستم سوخت رسانی پیل با اجکتور در مدار تغذیه سوخت

(1) استفاده از کمپرسور در خط برگشت هیدروژن.

(2) استفاده از اجکتور در سیستم سوخت رسانی پیل سوختی.

اجکتور یک پمپ خلا ساده است که در آن هیچ گونه قطعه متحرک وجود ندارد. اجکتور با استفاده از پتانسیل فشاری ذخیره شده در مخزن سوخت و ایجاد یک جریان اولیه با سرعت بالا، سوخت اضافی و مصرف نشده خروجی از آند را مکیده و همراه با مقداری سوخت جدید به آند باز می‌گرداند. شکل 1 نمایی از یک سیستم سوخت‌رسانی با اجکتور در مدار تغذیه سوخت را برای یک پیل سوختی غشا پلیمری نشان می‌دهد.

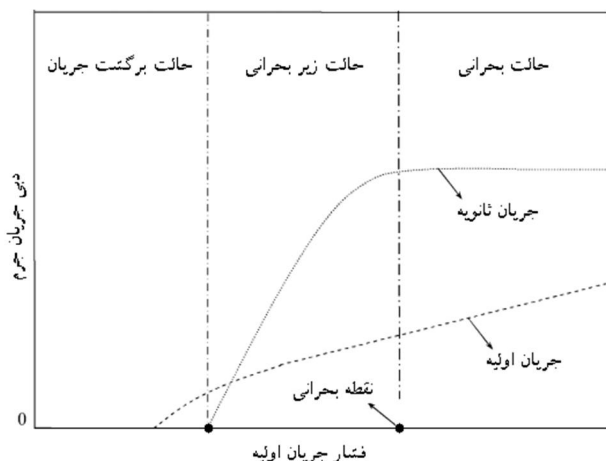
استفاده از اجکتور در سیستم پیل سوختی به جای استفاده از کمپرسور دارای برتری‌های زیادی است. ارزان‌تر بودن، طراحی ساده، سر و صدای کمتر نسبت به کمپرسور، نداشتن قطعه متحرک و به همین دلیل عدم نیاز به تعمیر و نگهداری از جمله برتری‌های این روش نسبت به روش کمپرسور در خط برگشت است. علاوه بر این مزایا، اجکتور با حذف کمپرسور از مدار تغذیه سوخت، بخشی از توان پارازیتی سیستم را حذف کرده و در نتیجه بازده کل سیستم را افزایش می‌دهد. در مقابل این مزایا، معایبی نیز در روش استفاده از اجکتور به جای کمپرسور در خط برگشت سوخت وجود دارد. به عنوان مهم‌ترین این معایب می‌توان به توانایی کنترل پذیری پایین اجکتور در سیستم پیل سوختی و همچنین ضریب عملکرد نسبتاً پایین اجکتور در سیستم‌های دینامیک اشاره کرد.

برای تحلیل الکتروشیمیایی سیستم پیل سوختی غشا پلیمری و محاسبه و رسم ولتاژ و توان تولیدی پیل، پیش از این مدل‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از بهترین مدل‌های ارائه شده، مدل نیمه تجربی GSSEM¹ است که مان و همکاران [1] ارائه داده‌اند. مهمترین مزیت این مدل نسبت به مدل‌های دیگر این است که این مدل تقریباً تمام پدیده‌های موجود در پیل را در نظر می‌گیرد و همچنین برای پیل با مشخصات خاص ارائه نشده است و می‌توان از آن برای مطالعه تمام پیل‌های غشا پلیمری استفاده کرد. با این حال، اختلاف اندکی در نتایج این مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که به دلیل تغییر خواص گازهای ورودی نظیر دما و رطوبت نسبی، در نتیجه افت‌های گرمایی است. فولر و همکاران [2] با ایجاد تغییراتی در مدل قبلی GSSEM و وارد کردن میزان کاهش ولتاژ در اثر کارکرد پیل (پارامتر طول عمر) آن را کامل‌تر کردند. آملفت و همکاران [3] مطالعه‌ای تجربی را بر روی میزان افت ولتاژهای فعال سازی و افت‌های اهمی انجام داده و ضرایبی آزمایشگاهی را ارائه داده‌اند.

در مورد اجکتور سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری تحقیقات اندکی وجود دارد. کارنیک و همکاران [4] اجکتور مربوط به سیستم

2-Recirculation Ratio

1- Generalized Steady State Electrochemical Model



شکل 3 سه ناحیه کاری اجکتور نازل همگرا

$$\dot{m}_p = P_p A_t \sqrt{\left(\frac{\psi_p k}{R_g T_p}\right) \left[\frac{2}{(k+1)}\right]^{2(k-1)}} \quad (4)$$

$$M_t = 1 \quad (5)$$

ψ_p ضریب آیزنروتروپیک برای محاسبه افت‌های اصطکاکی جریان اولیه است. فشار جریان اولیه در اجکتور با توجه به چگالی جریان مورد نیاز پیل سوختی غشا پلیمری در ناحیه عملکرد زیر بحرانی از روابط آیزنروتروپیک و روابط پیل سوختی غشا پلیمری به دست می‌آید.

$$P_p = 9.18 \times 10^{-2} P_3 [1 + \sqrt{1 + 6.34 \times 10^{-17} \left(\frac{R_{H_2} T_p}{\psi_p P_s^2 A_t^2}\right) (n_{cell} A)^2 j^2}]^{3.445} \quad (6)$$

برای ناحیه بحرانی نیز معادله (7) را می‌توان نوشت:

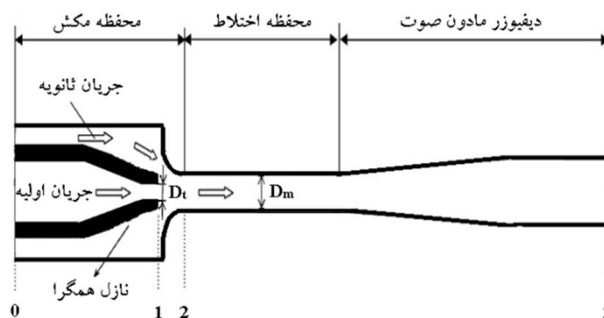
$$P_p = 1.81 \times 10^{-8} n_{cell} A \sqrt{\left(\frac{R_{H_2} T_p}{\psi_p k_{H_2} A_t^2}\right) j} \quad (7)$$

j چگالی جریان تولیدی پیل، n_{cell} تعداد تک پیل‌های توده پیل، A مساحت سطح فعال پیل، R_{H_2} ثابت گاز هیدروژن و k_{H_2} نسبت گرمای ویژه هیدروژن است. دو رابطه (6) و (7) در روند گسترش مدل با توجه به پارامترهای هندسی پیل نوشته شده‌اند و برای هر سیستم پیل سوختی قابل استفاده هستند. این دو رابطه جدید اهمیت کلیدی در ایجاد ارتباط بین پارامترهای هندسی توده پیل و پارامترهای هندسی اجکتور دارند. در واقع سه پارامتر کلیدی در طراحی یا انتخاب اجکتور در سیستم پیل سوختی غشا پلیمری (A ، n_{cell} و A_t) در این دو رابطه برای دو حالت عملکردی بحرانی و زیر بحرانی به هم ارتباط داده شده‌اند. با قرار دادن این سه پارامتر کلیدی در قالب یک پارامتر بی‌بعد به شکل معادله (8) می‌توان معادلات (6) و (7) را به شکل جدیدی بازنویسی کرد.

$$G^* = \frac{n_{cell} \cdot A}{A_t} \quad (8)$$

پارامتر بی‌بعد G^* می‌تواند به صورت نسبت اندازه توده پیل سوختی به اندازه اجکتور تعریف می‌شود. با جایگذاری G^* در معادلات (6) و (7) شکل جدید معادلات به ترتیب به شکل معادلات (9) و (10) خواهد بود.

$$P_p = 9.18 \times 10^{-2} P_3 [1 + \sqrt{1 + 6.34 \times 10^{-9} \left(\frac{R_{H_2} T_p}{\psi_p P_s^2}\right) (G^*)^2 j^2}]^{3.445} \quad (9)$$



شکل 2 نمایی از اجکتور نازل همگرای تحلیل شده در مدار تغذیه سوخت پیل غشا پلیمری

بر حسب تئوری جریان در اجکتور، عملکرد اجکتور بر حسب شرایط کاری به سه حالت عملیاتی: برگشت جریان، زیر بحرانی و بحرانی تقسیم می‌شود [8,9]. حالت برگشت جریان زمانی است که هیچ جریان ثانویه‌ای به درون اجکتور کشیده نمی‌شود. در واقع در این حالت استوکومتری سوخت در سیستم پیل سوختی کمتر از یک است و اجکتور هنوز به عنوان یک پمپ در مدار عمل نمی‌کند. بنابراین تحلیل حالت برگشت جریان در عمل نتیجه‌ای در بر نخواهد داشت. حالت زیر بحرانی، شروع کشیده شدن جریان ثانویه به داخل محفظه اختلاط اجکتور است و تا زمانی که دبی جریان ثانویه در نقطه بحرانی عملکرد اجکتور به ماکزیمم مقدار خود برسد، ادامه پیدا می‌کند. پس از این نقطه، اجکتور در کارکرد بحرانی قرار می‌گیرد که در این حالت دبی جریان ثانویه تقریباً ثابت می‌ماند. عملکرد اجکتور در ناحیه بحرانی کاهش خواهد یافت چرا که با افزایش فشار اولیه و مصرف بیشتر پتانسیل فشاری مخزن، عملاً دبی جریان ثانویه تغییری نکرده و تأثیر مطلوبی بر استوکومتری جریان سوخت نخواهد گذاشت. در شکل 3 به طور شماتیک سه ناحیه عملیاتی یک اجکتور با نازل همگرا نمایش داده شده است.

در مدل گسترش یافته حاضر، دو حالت بحرانی و زیر بحرانی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. نقطه بحرانی عملکرد اجکتور زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت فشار ثانویه (P_2) به فشار اولیه (P_1) برابر با نسبت فشار بحرانی شود. در واقع رژیم جریان اولیه در این نقطه از زیر صوت به صوت تغییر می‌کند. نسبت فشار بحرانی از رابطه (1) به دست می‌آید [6].

$$P_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1)$$

در رابطه (1) نسبت گرماهای ویژه گاز عبوری از نازل همگرا است.

3- توسعه مدل

3-1- زیر مدل اجکتور

نرخ جرمی جریان اولیه (\dot{m}_p) و عدد ماخ در گلوگاه (M) برای جریان زیر صوتی ($P_s > P_p \cdot P_{cr}$) در نازل همگرا با استفاده از روابط جریان آیزنروتروپیک و موازنه انرژی در نازل به ترتیب از روابط (2) و (3) محاسبه می‌شوند [6].

$$\dot{m}_p = P_p A_t \sqrt{\frac{2\psi_p k \left[\left(\frac{P_s}{P_p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_s}{P_p}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}{(k-1)R_g T_p}} \quad (2)$$

$$M_t = \sqrt{\frac{2\left[1 - \left(\frac{P_s}{P_p}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}{(k-1)}} \quad (3)$$

A_t مساحت گلوگاه، R_g ثابت گاز و T_p دمای جریان اولیه است. برای جریان صوتی ($P_s < P_p \cdot P_{cr}$) نیز نرخ جرمی جریان اولیه و عدد ماخ به شکل معادلات (4) و (5) است [6].

$$1.75 \leq P_p \leq 10.5 \text{ bar} \quad (20\text{-الف})$$

$$1.0 \leq P_s \leq 2.8 \text{ bar} \quad (20\text{-ب})$$

$$1.1 \leq P_3 \leq 3.0 \text{ bar} \quad (20\text{-پ})$$

$$2.1 \leq D_t \leq 3.2 \text{ mm} \quad (20\text{-ت})$$

$$5.2 \leq D_m \leq 8.0 \text{ mm} \quad (20\text{-ث})$$

استوکيومتری سمت آند پیل سوختی غشا پلیمری با توجه به قانون موازنه جرم به دست می‌آید.

$$S_{H_2} = \frac{\dot{m}_p + \dot{m}_s y_s^{H_2}}{\dot{m}_{cons}} \quad (21)$$

$y_s^{H_2}$ کسر جرمی هیدروژن در خروجی آند و \dot{m}_{cons} نرخ جرمی هیدروژن مصرفی در سمت آند پیل سوختی غشا پلیمری است.

$$\dot{m}_{cons} = Mo_{H_2} \frac{\eta_{cell} i}{2F} \quad (22)$$

i جریان تولیدی پیل سوختی غشا پلیمری، Mo_{H_2} جرم مولی هیدروژن و F ثابت فارادی است.

3-2-2- زیر مدل توان

محاسبه توان و میزان افزایش بازده در پیل غشا پلیمری با تکمیل مدل GSSEM ارائه شده در مرجع [1]، انجام شده است. این مدل برای تمام پیل‌های غشا پلیمری با غشای نافیون قابل کاربرد است. طبق این مدل ولتاژ هر تک پیل از معادله (23) محاسبه می‌شود.

$$V_{cell} = E_{nernst} + \eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{concentration} \quad (23)$$

در این معادله، E_{nernst} مقدار پتانسیل ترمودینامیکی است که در شرایط ایده‌آل از واکنش حاصل می‌شود، η_{act} میزان افت ولتاژ فعال‌سازی است که عموماً ناشی از محدودیت‌هایی نظیر فعالیت کاتالیست و میزان کارایی آن در سمت آند و کاتد است، η_{ohmic} میزان افت ولتاژ اهمی پیل است که در رابطه با محدودیت هدایت پروتون غشا پلیمر و همچنین مقاومت الکترونی درونی مجموعه پیل است و $\eta_{concentration}$ نشانگر افت‌های انتقال جرم است [2].

3-2-2-1- پتانسیل ترمودینامیکی (E_{nernst})

معادله نرنست که بیانگر پتانسیل ترمودینامیکی فرایندهای شیمیایی است، برای پیل سوختی هیدروژن اکسیژن به کمک مقادیر اختلاف انرژی حالت استاندارد به شکل معادله (24) نوشته می‌شود [1].

$$E_{nernst} = 1.229 - (8 \times 10^{-4}) (T - 298.15) + (4.3085 \times 10^{-5}) T \ln(P_{H_2}^* \cdot P_{O_2}^{*0.5}) \quad (24)$$

در این معادله، T دمای پیل است. $P_{O_2}^*$ فشار جزئی اکسیژن در سطح مشترک گاز در کاتالیست کاند و $P_{H_2}^*$ فشار جزئی هیدروژن در سطح مشترک گاز در کاتالیست آند است [10].

$$P_{O_2}^* = P \left[1 - x_{H_2O}^{sat} - x_{other\ gasses}^{channel} \cdot \exp\left(\frac{0.291j}{T \cdot 0.832}\right) \right] \quad (25)$$

$$P_{H_2}^* = 0.5 P_{H_2O}^{sat} \times \left[1 / \left(\exp\left(\frac{1.653j}{T \cdot 1.334}\right) x_{H_2O}^{sat} \right) - 1 \right] \quad (26)$$

$x_{H_2O}^{sat}$ کسر مولی آب موجود در گاز به صورت اشباع در دمای داده شده، $x_{other\ gasses}^{channel}$ کسر مولی گازهای دیگر (به جز اکسیژن) در جریان هوا که عموماً نیتروژن است، $P_{H_2O}^{sat}$ فشار اشباع بخار آب در دمای داده شده است. $x_{H_2O}^{sat}$ در معادلات بالا، به شکل معادله (27) تعریف می‌شود.

$$P_p = 1.81 \times 10^{-4} \sqrt{\left(\frac{R_{H_2} T_p}{\psi_p k_{H_2} A_t^2} \right)} G^* j \quad (10)$$

جریان اولیه در محفظه مکش منبسط می‌شود. فشار پیرامون جریان منبسط شده را می‌توان با فشار جریان ثانویه (P_s) نشان داد. با استفاده از جریان آیزنتروپیک و قوانین موازنه انرژی برای جریان اولیه از مقطع 1 تا مقطع 2 رابطه (11) را خواهیم داشت [6].

$$\frac{P_p}{P_s} = \left[1 + 0.5(k-1)M_{p,2}^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad (11)$$

از رابطه (11) عدد ماخ جریان اولیه در مقطع 2، $M_{p,2}$ ، به دست می‌آید. تحلیل مقطع 2 در اجکتور برای مدل حاضر بسیار مهم است. با استفاده از عدد ماخ مقطع 2 دیگر خواص فیزیکی جریان اولیه در این مقطع محاسبه می‌شود (روابط 12-14):

$$\frac{T_p}{T_{p,2}} = 1 + 0.5(k-1)M_{p,2}^2 \quad (12)$$

$$V_{p,2} = M_{p,2} \sqrt{k R_g T_{p,2}} \quad (13)$$

$$\sqrt{\xi_{exp}} \frac{D_{p,2}}{D_t} = \left(\frac{M_t}{M_{p,2}} \right)^{0.5} \left[\frac{2 + (k-1)M_{p,2}^2}{2 + (k-1)M_t^2} \right]^{\frac{k+1}{4(k-1)}} \quad (14)$$

$T_{p,2}$ دمای جریان اولیه در مقطع 2، $V_{p,2}$ سرعت جریان اولیه در مقطع 2، $D_{p,2}$ قطر جریان اولیه در مقطع 2 و ξ_{exp} ضریب محاسبه افت‌های اصطکاکی به دلیل فرایند اختلاط دو جریان اولیه و ثانویه می‌باشد. رابطه ارائه شده برای محاسبه نرخ جرمی جریان ثانویه در اجکتور نازل همگرا در مرجع [6] به شکل معادله (15) است.

$$\dot{m}_s = \frac{2\pi \bar{p}_s V_{p,2} (D_m - D_{p,2}) [D_m + (1 + n_v) D_{p,2}]}{4(1 + n_v)(2 + n_v)} \quad (15)$$

n_v توان تابع سرعت و \bar{p}_s چگالی میانگین جریان ثانویه است و با فرض گاز کامل به دست می‌آید.

$$\bar{p}_s = \left(\frac{P_s}{T_s} \right) \left(\frac{\sum_i n_s^i Mo_i}{R \sum_i n_s^i} \right) \quad (16)$$

در این رابطه، n_s^i نرخ جریان مولی جزء i ام، Mo_i جرم مولی جزء i ام و \bar{R} ثابت جهانی گاز است. توان تابع سرعت، با استفاده از یک مدل دو بعدی برای پروفیل سرعت در ناحیه اختلاط بوده و در مرجع [6] مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار n_v برای اجکتور نازل همگرا بزرگتر از یک ($n_v > 1$) فرض می‌شود.

$$n_v = 1.393 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{\beta_p}{0.05}\right) + 0.456 \beta_D + 0.1668 \quad (17)$$

β_D و β_p به ترتیب نسبت فشار و نسبت قطر هستند و به شکل معادلات (18) و (19) تعریف می‌شوند.

$$\beta_p = \frac{P_s^{0.8}}{P_p^{1.1}} \quad (18)$$

$$\beta_D = \frac{D_m}{D_t} \quad (19)$$

رابطه ارائه شده n_v ، برای مقادیر مشخصی از P_p ، P_s ، P_3 ، D_t و D_m معتبر است. این مقادیر به صورت روابط (20) است [6].

یک رابطه تجربی برای مقاومت ویژه غشا نافیون در مرجع [11] به شکل معادله (36) گزارش شده است.

$$r_m = \frac{181.6 [1 + 0.03j + 0.062(\frac{T}{303})^2 j^{2.5}]}{(\lambda_{age} - 0.634 - 3j) \exp[4.18(\frac{1-303}{T})]} \quad (36)$$

در این تعریف λ_{age} یک پارامتر قابل تنظیم معمولاً بین 10 تا 20 است که متاثر از روند تولید غشا است [2]. اطلاعات کامل تری در مورد این پارامتر در مرجع [12] وجود دارد.

3-2-4- افت‌های انتقال جرم

این افت در اثر محدودیت‌های نفوذ واکنش دهنده‌ها در لایه پخش گاز و کاتالیست ایجاد می‌شوند. معادله ارائه شده برای این افت در مراجع [13,14] به شکل معادله‌های (379) و (38) ارائه شده است.

$$\eta_{concentration} = m \exp(n \cdot i) \quad (37)$$

$$m = 3.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-5} (T - 273.15), T \leq 312.15 \text{ K} \quad (38\text{-الف})$$

$$m = 1.1 \times 10^{-4} - 1.2 \times 10^{-6} (T - 273.15), T \geq 312.15 \text{ K} \quad (38\text{-ب})$$

n در این معادلات یک مقدار ثابت است که مرجع [13] مقدار 0/008 را پیشنهاد کرده است.

3-2-5- توان و بازده در توده‌ی پیل سوختی غشا پلیمری

توده پیل سوختی غشا پلیمری به تنهایی قادر به تولید و کنترل توان الکتریکی خود نیست و نیازمند سیستم‌های جانبی است. یکی از این سیستم‌های جانبی، سیستم تأمین سوخت سمت آند است. طبق مطالب ذکر شده در مقدمه سیستم تأمین سوخت پیل را می‌توان به دو شکل طراحی کرد، یکی استفاده از کمپرسور در خط برگشت هیدروژن و دیگری استفاده از اجکتور در سیستم سوخت رسانی پیل سوختی. لذا توان تولیدی خالص پیل برای این دو حالت متفاوت است و به ترتیب از رابطه (39) و (40) قابل محاسبه است.

$$\dot{W}_{net}^{comp} = \dot{W}_{gross,stack} - \dot{W}_{other} - \dot{W}_{H.c} \quad (39)$$

$$\dot{W}_{net}^{elec} = \dot{W}_{gross,stack} - \dot{W}_{other} \quad (40)$$

در این دو رابطه $\dot{W}_{gross,stack}$ توان ناخالص تولیدی توده پیل سوختی، \dot{W}_{other} مجموع توان‌های پارازیتی سیستم‌های جانبی به جز کمپرسور هیدروژن در خط برگشت سوخت و $\dot{W}_{H.c}$ توان پارازیتی کمپرسور هیدروژن در خط برگشت سوخت است. توان ناخالص تولیدی توده پیل با معادله (41) محاسبه می‌شود.

$$\dot{W}_{gross,stack} = i V_{cell} n_{cell} \quad (41)$$

i جریان، V_{cell} ولتاژ تولیدی یک تک پیل و n_{cell} تعداد تک پیل‌های موجود در یک توده پیل است. بازده خالص توده پیل با جایگذاری توان خالص تولیدی در رابطه بازده پیل تعریف می‌شود.

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{net} Mo_{H_2}}{\dot{m}_{cons} HHV_{H_2}} \quad (42)$$

\dot{W}_{net} توان خالص سیستم، Mo_{H_2} جرم مولی هیدروژن، HHV_{H_2} ارزش گرمایی بالای هیدروژن، \dot{m}_{cons} دبی جرمی مصرف هیدروژن در توده پیل است. برای مقایسه دو سیستم تغذیه سوخت اجکتور و کمپرسور فرض می‌شود که توان‌های پارازیتی مربوط به سیستم تأمین اکسیدان و سیستم

$$x_{H_2O}^{sat} = \frac{P_{H_2O}^{sat}}{p} \quad (27)$$

P فشار عملکرد پیل و $P_{H_2O}^{sat}$ فشار بخار آب در دمای داده شده است [10].

$$\ln(P_{H_2O}^{sat}) = 70.4346 - \frac{7362.6981}{T} + 6.9521 \times 10^{-3}(T) - 9.0000 \ln(T) \quad (28)$$

$x_{other\ gases}^{channel}$ با میانگین‌گیری لگاریتمی در سطح پیل و در طول جریان گاز درون کانال‌ها به دست می‌آید [10].

$$x_{other\ gases}^{channel} = \frac{x_{other\ gases}^{in, hum} - x_{other\ gases}^{out, hum}}{\ln(\frac{x_{other\ gases}^{in, hum}}{x_{other\ gases}^{out, hum}})} \quad (29)$$

$x_{other\ gases}^{in, hum}$ و $x_{other\ gases}^{out, hum}$ به ترتیب کسر مولی نیتروژن در جریان هوای مرطوب ورودی و کسر مولی نیتروژن در جریان هوای مرطوب خروجی هستند و با روابط (30) و (31) محاسبه می‌شوند.

$$x_{other\ gases}^{in, hum} = 0.78 (1 - x_{H_2O}^{sat}) \quad (30)$$

$$x_{other\ gases}^{out, hum} = \frac{1 - x_{H_2O}^{sat}}{1 + [1 - (1/s_{air})](0.21/0.79)} \quad (31)$$

3-2-2- افت ولتاژ فعال سازی¹

معادله نیمه تجربی ارائه شده در مرجع [1] برای افت‌های فعال سازی به شکل معادله (32) است.

$$\eta_{act} = \psi_1 + \psi_2 T + \psi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \psi_4 T \ln(i) \quad (32)$$

$C_{O_2}^*$ غلظت اکسیژن در سطح مشترک گاز در کاتالیست کاتد است که رابطه 33 برای آن ارائه شده است [10].

$$C_{O_2}^* = 1.97 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{498}{T}\right) P_{O_2}^* \quad (33)$$

ضرایب ψ برای افت ولتاژ فعال‌سازی در زیر مدل توان با توجه به داده‌های مرجع [1] به شکل $\psi_1 = -0.948$ ، $\psi_2 = 3.33 \times 10^{-3}$ ، $\psi_3 = 7.6 \times 10^{-5}$ و $\psi_4 = -1.92 \times 10^{-4}$ انتخاب شده است. در این مرجع مقادیر این ضرایب برای انواع خاصی از غشاهای پلیمری به دست آمده‌اند اما در عمل نشان داده شده است که این ضرایب برای هر پیل سوختی غشا پلیمری با دقت خوبی قابل استفاده هستند.

3-2-3- افت ولتاژ اهمی²

با فرض ناچیز بودن مقاومت الکترونی در صفحات جمع‌کننده گرافیتی و الکترودهای گرافیتی در برابر مقاومت پروتونی غشا و طبق قانون اهم، افت ولتاژ اهمی از رابطه (34) به دست می‌آید.

$$\eta_{ohmic} = -i \cdot R^{proton} \quad (34)$$

R^{proton} مقاومت در برابر جریان پروتون در غشا است. یک بیان عمومی برای مقاومت که بتواند تمام پارامترهای مهم غشا را در خود داشته باشد به شکل رابطه (35) است.

$$R^{proton} = r_m \frac{l_m}{A} \quad (35)$$

r_m مقاومت ویژه غشا برای جریان پروتون و l_m ضخامت غشا پلیمر است.

1- Activation Overvoltages

2- Ohmic Overvoltage

استوکیومتری هیدروژن در حالتی که اجکتور در مدار تغذیه سوخت قرار دارد طبق معادله (21) به دست می‌آید. تابعیت این معادله به سه پارامتر \dot{m}_p ، وابسته باشد. بنا بر این تابعیت معادله (46) به استوکیومتری هیدروژن باعث می‌شود که معادله به چگالی جریان توده پیل وابسته شود. این موضوع به طور واضحی در ادامه (در شکل 6) نشان داده خواهد شد. همچنین این معادله به خاطر داشتن ترم (P_3/P_5) نشان می‌دهد که میزان افزایش بازده در نتیجه استفاده از اجکتور در پیل‌های با افت فشار بالاتر در طول کانال‌های سوخت آند بیشتر است. لذا کاربرد اجکتور در چنین مواردی به جای کمپرسور خط برگشت منطقی‌تر است.

روند محاسبه پارامترهای میزان افزایش بازده و میزان ذخیره توان در نتیجه استفاده از اجکتور به جای کمپرسور در مدار تغذیه سوخت پیل سوختی غشا پلیمری، در مدل توسعه یافته حاضر، به طور شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین در این شکل دو زیر مدل توان و اجکتور و رابطه‌ی بین آن‌ها به وضوح نمایش داده شده است.

4- نتایج و بحث

مدل ارائه شده برای یک توده پیل سوختی غشا پلیمری با سطح فعال 1000 سانتی‌متر مربع برای هر پیل و تعداد 381 پیل بصورت سری، همچنین نافیون 115 به عنوان غشا مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط عملکردی پیل مورد بررسی در جدول 1 نشان داده شده است. اجکتور مورد استفاده در مطالعه نیز یک اجکتور نازل همگرا با مشخصات داده شده در جدول 2 است. ولتاژ تولیدی هر تک پیل و همچنین توان تولیدی کل پیل در شکل 5 نشان داده شده است. ولتاژ تولیدی تک پیل‌ها یک روند نزولی و توان تولیدی پیل یک روند صعودی را با افزایش چگالی جریان نشان می‌دهند. این منحنی‌ها با استفاده از زیر مدل توان به دست آمده‌اند.

شکل 6 میزان افزایش بازده در نتیجه استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت و همچنین استوکیومتری هیدروژن را در سمت آند پیل سوختی برای مقادیر مختلف چگالی جریان نشان می‌دهد.

جدول 1 شرایط عملکردی پیل مورد بررسی

مقدار	پارامتر (واحد)
353	دمای عملکرد پیل، T (K)
3	فشار عملکرد پیل، P (bar)
2.8	فشار خط برگشت آند، P_s (bar)
353	دمای مرطوب ساز، K
298	دمای جریان اولیه‌ی هیدروژن در اجکتور، (K)
353	دمای خط برگشت هیدروژن، (K)
100	رطوبت نسبی اکسیژن در ورودی کاتد، (%)
80	رطوبت نسبی هیدروژن در ورودی آند، (%)
45	کسر جرمی بخار آب در خروجی آند، (%)
2	استوکیومتری هوا در سمت کاتد
60	بازده کمپرسور در خط برگشت هیدروژن، (%)

جدول 2 مشخصات اجکتور

مقدار	پارامتر (واحد)
2/8	قطر گلوگاه نازل همگرا، D_i (mm)
8	قطر محفظه اختلاط، D_m (mm)
2/86	نسبت قطر، β_D

خنک‌کاری (\dot{W}_{other}) در هر دو مورد برابر است. با این فرض می‌توان میزان افزایش بازده را به شکل معادله (43) مدل کرد.

$$\Delta \eta = \eta_{eject\ sys}^{net} - \eta_{comp\ sys}^{net} \quad (43)$$

محاسبه می‌شوند. سپس با جایگذاری در معادله (43) رابطه (44) بدست می‌آید:

$$\Delta \eta = \frac{\dot{W}_{H_2,C} Mo_{H_2}}{\dot{m}_{cons} HHV_{H_2}} \quad (44)$$

$\dot{W}_{H_2,C}$ توان مورد نیاز کمپرسور هیدروژن است که پس از محاسبه و ساده‌سازی بر حسب توان توده پیل به شکل معادله (45) باز نویسی شده است.

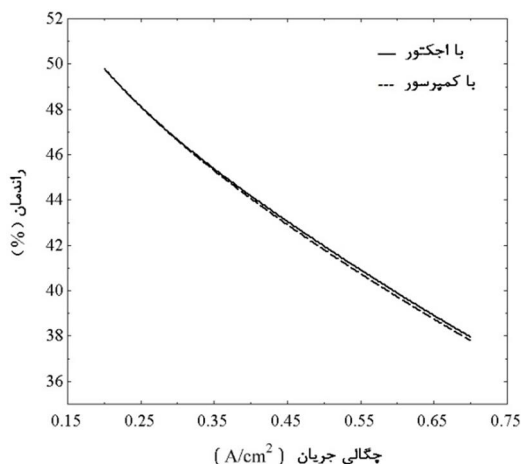
$$\dot{W}_{H_2,C} = 1.045 \times 10^{-8} \times \frac{(S_{H_2} - 1) \dot{W}_{gross,stack} T C_{p,H_2}}{V_{cell} \eta_c} \times \left[\left(\frac{P_3}{P_5} \right)^{0.02903} - 1 \right] \quad (45)$$

S_{H_2} استوکیومتری هیدروژن، T دمای توده پیل، C_{p,H_2} گرمای ویژه‌ی فشار ثابت هیدروژن، V_{cell} ولتاژ تولیدی پیل، η_c بازده کمپرسور هیدروژن، P_3 فشار خط تغذیه توده پیل و P_5 فشار خط برگشت هیدروژن است. با جایگذاری معادلات (22) و (41) به ترتیب در معادلات (44) و (45) و سپس قرار دادن معادله (45) در معادله (44) میزان افزایش بازده به شکل معادله (46) به دست می‌آید.

$$\Delta \eta = 1.184 \times 10^{-4} \times \frac{(S_{H_2} - 1) T}{\eta_c} \times \left[\left(\frac{P_3}{P_5} \right)^{0.02903} - 1 \right] \quad (46)$$



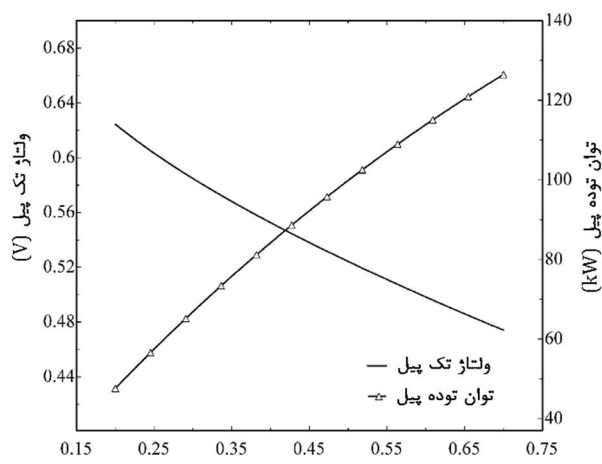
شکل 4 روند محاسبات مدل برای محاسبه میزان افزایش بازده سیستم



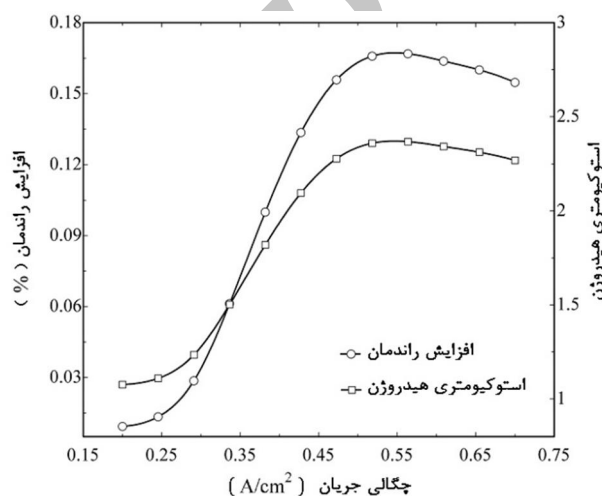
شکل 8 مقایسه بازده دو سیستم پیل سوختی، با اجکتور و با کمپرسور در خط برگشت سوخت

در واقع بر حسب هر کاربرد ویژه‌ای نیاز است که پیل در یک چگالی جریان ویژه‌ای کار کند. به عنوان مثال در کاربردهای حمل و نقل، پیل معمولاً در ماکزیمم توان خود کار می‌کند که این معادل چگالی جریان ماکزیمم خواهد بود. بنا بر این طراحی اجکتور باید به گونه‌ای باشد که مقدار نقطه بهینه ذکر شده در بالا نیز مقدار ماکزیمم خود را داشته باشد و از طرفی مقدار متناظر با آن بر روی محور عمودی نیز باید بیشترین مقدار باشد. لذا روند بهینه‌سازی می‌تواند با توجه به این دو قید انجام پذیرد. مقدار مصرف توان کمپرسور، در واقع میزان ذخیره توان در نتیجه استفاده از اجکتور و حذف کمپرسور در مدار تغذیه سوخت توده پیل است. این مقدار ذخیره توان برای اجکتور مورد بررسی، در شکل 7 نمایش داده شده است. روند تغییرات بر خلاف میزان افزایش بازده یک روند کاملاً صعودی است. در واقع هر چه که سیستم پیل سوختی در توان بالاتری کار کند میزان توان پارازیته افزایش خواهد یافت. این توان پارازیته با استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت مهار شده و این امر باعث افزایش راندمان کل سیستم خواهد شد. این افزایش راندمان در شکل 8 به طور آشکار نشان داده شده است.

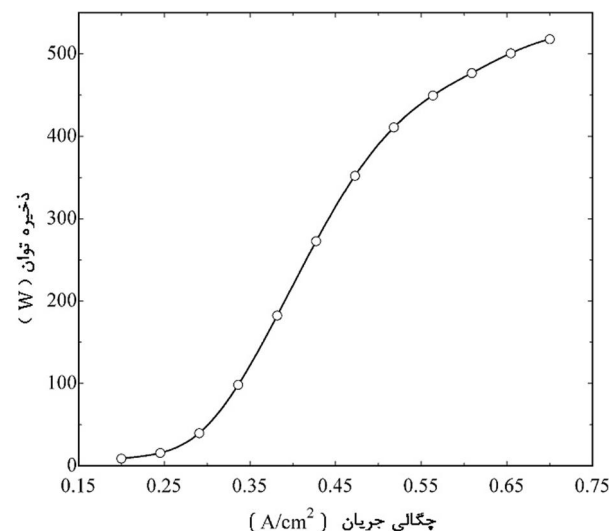
در شکل 8 بازده دو سیستم با اجکتور و با کمپرسور در خط برگشت سوخت مقایسه شده است. افزایش بازده در سیستم با اجکتور کاملاً مشهود است. این مقدار افزایش بازده در چگالی جریان‌های بالا (بالتر از 0/4 آمپر بر سانتی‌متر مربع) که افت شدیدتری در بازده توده پیل وجود دارد، بیشتر است. دلیل این امر را می‌توان در منحنی‌های شکل 6 جستجو کرد. منحنی میزان افزایش راندمان نشان می‌دهد که این مقدار در نتیجه استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت، در چگالی جریان‌های متفاوت به گونه‌ای تغییر می‌کند که در یک چگالی جریان ویژه مقدار ماکزیمم خود را دارد. از طرفی میزان افزایش راندمان مستقیماً بر حسب معادله (43) با استوکیومتری در ارتباط است و دلیل تغییرات مشابه این دو پارامتر (میزان افزایش راندمان و استوکیومتری) نیز همین امر است. با این استدلال می‌توان گفت که دلیل بیشتر بودن میزان افزایش راندمان در چگالی جریان‌های بالاتر، روند عملکرد اجکتور در این چگالی جریان‌ها است. در واقع این موضوع شدیداً تحت تأثیر طراحی اجکتور و پارامترهای هندسی آن است. به این معنی که طراحی اجکتور و انتخاب پارامترهای هندسی آن می‌تواند در مقدار چگالی جریان ویژه معادل، با ماکزیمم میزان افزایش راندمان شدیداً تأثیر بگذارد. در واقع می‌توان برای هر کاربرد بخصوص با توجه به نقطه عملکرد پیل بهترین



شکل 5 ولتاژ تک پیل و توان تولیدی توده پیل بر حسب چگالی جریان



شکل 6 میزان افزایش بازده و استوکیومتری بر حسب چگالی جریان



شکل 7 مقدار ذخیره توان در نتیجه استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت

مشاهده می‌شود که روند تغییرات این دو پارامتر دقیقاً شبیه به هم است. منحنی افزایش بازده، یک نقطه بهینه را در چگالی جریان متناظر با ماکزیمم مقدار استوکیومتری نشان می‌دهد. مکان این نقطه بر روی محور افقی و همچنین مقدار متناظر با آن بر روی محور عمودی، دو پاراکتر بسیار مهم در بهینه‌سازی ابعاد اجکتور مورد نیاز طبق هندسه‌ی پیل مورد نظر است.

طراحی یا انتخاب را برای اجکتور مورد نیاز (پارامترهای هندسی اجکتور) انجام داد.

Eject اجکتور
I اجزاء شیمیایی

زیر نویس ها

Cons مصرفی
M محفظه احتراق
P جریان اولیه
S جریان ثانویه
1 گلوگاه نازل
2 ابتدای محفظه اختلاط
3 خروجی دیفیوزر

5- نتیجه گیری

استفاده از اجکتور در سیستم پیل سوختی برای بازگرداندن سوخت مصرف نشده به چرخه سوخت، به جای استفاده از کمپرسور، دارای برتری‌های زیادی است که در مقدمه به تعدادی از آنها اشاره شد. در این مقاله با گسترش مدل‌های قبلی در محاسبه عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری، تأثیر استفاده از اجکتور در مدار تغذیه سوخت بر بازده خالص توده پیل مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که استفاده از اجکتور می‌تواند بازده خالص توده پیل را افزایش داده و مقداری ذخیره توان را به دست دهد. از مطالعه انجام شده دو نتیجه جانی نیز حاصل شد؛

1. مشاهده شد که افزایش توان و بازده در چگالی جریان‌های بالاتر، بیش‌تر است، لذا استفاده از اجکتور را در کاربردهای حمل و نقل و کاربردهای مشابه که توده پیل مجبور به کار در ماکزیمم توان خود است، به صرفه‌تر نشان می‌دهد.

2. میزان افزایش بازده در نتیجه استفاده از اجکتور در پیل‌های با افت فشار بالاتر در طول کانال‌های سوخت آند بیشتر است. لذا کاربرد اجکتور در چنین مواردی به جای کمپرسور خط برگشت سوخت منطقی‌تر است.

7- تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) به خاطر حمایت مالی از این مطالعه تقدیر و تشکر می‌کنند.

8- مراجع

- [1] R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A.I. Hooper, H.M. Jensen, B.A. Peppley, P.R. Roberge, Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 86, pp. 173-180, 2000.
- [2] M.W. Fowler, R.F. Mann, J.C. Amphlett, B.A. Peppley, P.R. Roberge, Incorporation of voltage degradation into a generalized steady state electrochemical model for a PEM fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 106, pp. 274-283, 2002.
- [3] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, A. Rodrigues, Parametric modeling of the performance of a 5-kw proton exchange membrane fuel cell stack, *J. Power Sources*, Vol. 49, pp. 349-356, 1994.
- [4] A.Y. Karnik, J. Sun, J.H. Buckland, Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, June, 2006.
- [5] J. He, S.Y. Choe, C.O. Hong, Analysis and control of a hybrid fuel delivery system for a polymer electrolyte membrane fuel cell, *J. Power Sources*, Vol. 185, pp. 973-984, 2008.
- [6] Y. Zhu, Y. Li, New theoretical model for convergent nozzle ejector in the proton exchange membrane fuel cell system, *J. Power Sources*, Vol. 191, pp. 510-519, 2009.
- [7] R. Cownden, M. Nahon, M.A. Rosen, Modelling and analysis of a solid polymer fuel cell system for transportation applications, *J. Hydrogen Energy* Vol. 26, pp. 615-623, 2001.
- [8] R.J. Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, V.A. Petrenko, A 1-D analysis of ejector performance, *J. Power Sources*, Vol. 22, pp. 354-364, 1999.
- [9] Y. Bartosiewicz, Z. Aidoun, P. Desevaux, Y. Mercadier, Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors, *J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, pp. 56-70, 2005.
- [10] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, T.J. Harris, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, Performance modeling of the Ballard Mark IV solid polymer electrolyte fuel cell: 1 mechanistic model development, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 142, pp. 1-8, 1995.
- [11] F.N. Buchi, G.G. Scherer, In-situ resistance measurement of Nafion 117 membranes in polymer electrolyte fuel cell, *J. Electroanal. Chem.*, Vol. 404, pp. 37-43, 1996.
- [12] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, S. Gottesfeld, Polymer electrolyte fuel cell model, *J. Electrochem. Soc.* Vol. 138, pp. 2334, 1991.
- [13] R. Chahine, F. Laurencelle, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Bose, A. Laperriere, Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack, *J. Fuel Cells*, Vol. 1, pp. 66-71, 2001.
- [14] Me. Miansari, K. Sedighi, M. Amidpour, E. Alizadeh, Mo. Miansari, Experimental and thermodynamic approach on proton exchange membrane fuel cell performance, *J. Power Sources*, Vol. 190, pp. 356-361, 2009.

6- فهرست علائم

A	مساحت سطح پیل (m^2)
C	گرمای ویژه ($J kg^{-1} K^{-1}$)
D	قطر (m)
HHV	ارزش گرمایی بالای سوخت ($kJ mol^{-1}$)
I	جریان تولیدی پیل (آمپر)
J	چگالی جریان (آمپر بر سانتی متر مربع)
k	نسبت گرمای ویژه‌ی گاز
L	ضخامت غشاء (mm)
M	عدد ماخ
m	دبی جرمی (kg/s)
Mo	وزن ملکولی ($kg mol^{-1}$)
P	فشار
R	مقاومت الکتریکی
r	مقاومت ویژه الکتریکی
T	دما (K)
V	ولتاژ (V)
W	توان (W)
Y	کسر جرمی

علائم یونانی

\bar{p}	چگالی ($kg m^{-3}$)
ψ	ضریب آیزنتروپیک جریان

بالانویس ها

Comp کمپرسور