



بررسی عملکرد سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری با اجکتور نازل همگرا

ارسلان مقصودی^۱، ابراهیم افشاری^{۲*}، حسین احمدی کیا^۳

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

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۳- دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱. e.afshari@eng.ui.ac.ir

چکیده- در این مقاله، سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری به وسیله اجکتور نازل همگرا، مطالعه شده است. این سیستم برای کاهش توان پارازیتی پیل، بازگشت دوباره سوخت و استفاده از انرژی پتانسیل فشاری مخزن سوخت بسیار موثر است. با انتخاب یک مدل تقارن محوری اجکتور، معادلات حاکم شامل: بقا جرم، مومنتم، انرژی و معادله حالت به روش عددی حل شده‌اند و تأثیر افت فشار گاز در کانال سوخت سمت آند، فشار عملکرد پیل سوختی و دمای عملکرد پیل بر عملکرد اجکتور بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش افت فشار پیل، عملکرد اجکتور بهبود یافته و حتی در فشار جریان اولیه پایین‌تر، افزایش عملکرد بهتر خواهد بود این مزیت خوبی می‌باشد که در فشار پایین‌تر ماکزیمم نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه بدست می‌آید. با افزایش فشار و دمای کارکرد پیل نیز عملکرد اجکتور بهتر خواهد شد؛ هر چند که حساسیت عملکرد اجکتور به افزایش فشار کارکرد، بسیار بیشتر است. تأثیر نسبت قطر ناحیه اختلاط به قطر نازل نیز به عنوان یک پارامتر هندسی مهم بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش این نسبت، نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به اولیه در فشار جریان اولیه بالاتر بیشتر شده است.

کلیدواژگان: پیل سوختی غشا پلیمری، اجکتور، جریان برگشتی آند، عملکرد، مدل‌سازی عددی.

Analysis of performance convergent nozzle ejector in the PEM system

A. Maghsoodi¹, E. Afshari^{2*}, H. Ahmadikia³

1-MSc. Student, Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran

3- Assoc. Prof., Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Isfahan Univ., Isfahan, Iran

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

Abstract –In this study, convergent nozzle ejector in the PEM fuel cell system is analyzed. This method can reduce the parasitic power of the fuel cell, recycle the unconsumed hydrogen to the fuel cell to increase the fuel usage efficiency, utilize the pressure potential energy of hydrogen and regulate the anode humidity with the recycle gas. For this purpose, continuity, momentum, energy and state equations are solved by numerical methods and effects of pressure drop (through the channel towards the anode), operating pressure and temperature of the fuel cell and also nozzle diameter on the ejector performance was analyzed. With decreasing of pressure drop, even in primary lower pressure, increasing of performance pressure the performance of ejector will improved. The temperature increase has no effect on the performance of the ejector itself, but has enormous effect on the fuel cell. Increasing the diameter ratio of the constant diameter zone to the nozzle diameter leads to increasing of recirculation anode line of the fuel in higher pressure.

Keywords: PEM Fuel Cell, Ejector, Recirculation, Performance, CFD.

۱- مقدمه

پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل مشخصات بارزی مانند: راندمان بالا، دانسیته توان بالا، دمای عملکرد پایین، زمان راه‌اندازی کوتاه، دوام و قابلیت توان بالا، تولید آلاینده‌گی اندک و نداشتن قطعه متحرک، به عنوان بهترین انتخاب برای جایگزینی باتری‌ها و موتورهای احتراقی تولید توان در نظر گرفته شده است. در این پیل، عموماً از هیدروژن خالص به عنوان سوخت استفاده می‌شود [۱]. در طراحی این پیل متداول است که از ضرایب استوکیومتریکی بالا (دبی ورودی بالاتر از مصرف در ورودی پیل) استفاده شود تا گازهای واکنش‌گر فراوان برای پیل تامین شود و عملکرد پیل سوختی بهبود یابد، اما ضرایب استوکیومتریکی بالا، افت‌های پارازیتی به واسطه کمپرسور را افزایش می‌دهد و باعث کاهش راندمان کلی سیستم پیل سوختی می‌شود [۲].

در حالی که فشار توده پیل سوختی نسبتاً پایین است، به منظور افزایش چگالی حجمی، سوخت در مخزن فشار بالا ذخیره می‌شود و سپس در پیل مصرف می‌شود. ناشی از اختلاف فشار بالای مخزن و توده پیل، انرژی پتانسیل فشاری بالایی ایجاد می‌شود که می‌توان به جای کمپرسور، با یک اجکتور بخشی از سوخت مورد نیاز آند پیل را تأمین کرد.

اجکتور نوع ساده شده‌ای از یک پمپ یا یک کمپرسور خلاء می‌باشد که در آن هیچ گونه پیستون، شیر، روتور و دیگر اجزای متحرک وجود ندارد. اجکتور، از هیدروژن فشار بالا به عنوان جریان اولیه، برای مکیدن خروجی آند به عنوان جریان ثانویه استفاده می‌کند. در واقع هیدروژن مصرف نشده در خروجی آند پیل توسط اجکتور دوباره به آند پیل باز گردانده می‌شود؛ به طوری که راندمان استفاده از سوخت افزایش می‌یابد [۳-۵].

از نظر تئوری جریان در اجکتور، عملکرد اجکتور بر حسب شرایط کاری به سه حالت عملیاتی: برگشت جریان، زیر بحرانی و بحرانی تقسیم می‌شود [۶-۱۰]. حالت برگشت جریان زمانی است که هیچ جریان ثانویه‌ای به درون اجکتور کشیده نمی‌شود. حالت زیر بحرانی، شروع کشیده شدن جریان ثانویه به داخل محفظه اختلاط اجکتور می‌باشد. زمانی که جریان ثانویه کشیده شده به بیشینه مقدار خود می‌رسد، در فشارهای بالاتر از فشار جریان اولیه متناظر با جریان ثانویه ماکزیمم، دبی جریان ثانویه

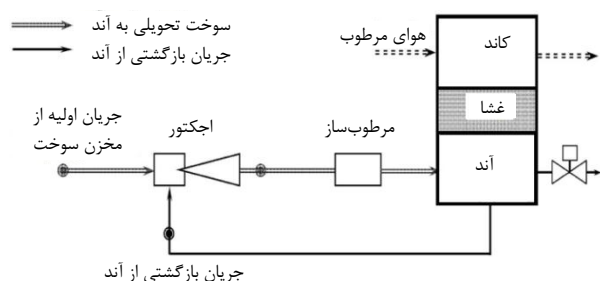
تقریباً ثابت می‌شود که در این حالت اجکتور در کارکرد بحرانی قرار می‌گیرد. اجکتور ممکن است در حالت زیر بحرانی یا حتی در زمان راه‌اندازی، تغییر بار و همچنین در زمان خاموش شدن، در حالت برگشت جریان کار کند.

بر خلاف سیستم‌های سرمایشی و همچنین سیستم سوخت رسانی پیل سوختی اکسید جامد، که در آنها اجکتور با نازل همگرا - واگرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، در اجکتور سیستم سوخت رسانی آند پیل سوختی غشا پلیمری از نازل همگرا برای تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی استفاده می‌شود. این کار سبب کاهش چگالش بخار آب خروجی از آند پیل در داخل اجکتور می‌شود. در داخل اجکتور به خاطر سرعت بالا، با کاهش دما رو به رو هستیم که این کاهش دما در فشار موجود، سبب چگالش بخار آب خواهد شد. از این رو برای تحلیل جریان در اجکتور نیاز به درک عمیقی از دینامیک سیالات و ترمودینامیک می‌باشد.

اجکتورها به طور وسیعی در صنعت استفاده می‌شوند و در دهه اخیر به صورت نظری، تجربی و روش‌های عددی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۶-۹]. اکثر مدل‌های موجود بر پایه تکنیک یک بعدی برای اجکتور سیستم‌های سرمایشی [۱۰-۱۲] و پیل سوختی اکسید جامد [۱۳-۱۶] استفاده شده‌اند. در مورد اجکتور سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری تحقیقات بسیار اندکی وجود دارد. کارمیک و همکارانش [۱۷، ۱۸] اجکتور مربوط به سیستم سوخت‌رسانی آند پیل غشا پلیمری را با استفاده از مدل یک بعدی و فرض ناحیه اختلاط ثابت مطالعه کرده‌اند. باو و همکارانش [۱۹] مدلی برای اجکتور سیستم تغذیه سوخت آند پیل غشا پلیمری ارائه داده‌اند که تنها عملکرد اجکتور را در شرایط عملیاتی بحرانی تحلیل می‌کند. هی و همکارانش [۲۰] سیستم تحویلی سوخت در پیل سوختی غشا پلیمری که شامل دو خط جریان بازگشتی به آند و دو منبع تامین است را بررسی کرده‌اند. فرضیات استفاده شده بر اساس مدل یک بعدی، اختلاط فشار ثابت و عملکرد اجکتور در حالت بحرانی است. ژو و لی [۳] 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.

از سیستم تغذیه سوخت با یک اجکتور نازل همگرا در خط جریان بازگشتی سمت آند پیل استفاده می‌شود. سیستم از سه قسمت توده پیل سوختی غشا پلیمری، یک اجکتور و یک مرطوب‌ساز غشایی تشکیل شده است. ساختار پیل سوختی غشا پلیمری به صورت دو الکترود (آند و کاتد) که توسط غشا از هم جدا شده‌اند، می‌باشد. الکترودها شامل صفحات قطبی، کانال‌های جریان گاز، لایه‌های پخش گاز و لایه‌های کاتالیست آند و کاتد می‌باشد. هوا و هیدروژن مرطوب از طریق کانال‌های گاز کاتد و آند که درون صفحات قطبی تعبیه شده‌اند وارد پیل می‌شود. هیدروژن از میان لایه پخش گاز آند که از کربن پارچه‌ای یا کربن کاغذی ساخته شده است به طرف لایه کاتالیست آند پخش می‌شود. در لایه کاتالیست آند، مولکول‌های هیدروژن به دو پروتون و دو الکترون تبدیل می‌شوند که پروتون‌های تولیدی از میان غشا به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت می‌کنند. غشا رسانای الکترون نیست و از این‌رو الکترون مدار خارجی را طی کرده و جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید. در طرف کاتد، اکسیژن از میان لایه پخش گاز کاتد حرکت می‌کند و در سطح لایه کاتالیست کاتد با پروتون‌ها و الکترون‌های انتقال یافته از آند واکنش داده و آب تشکیل می‌شود. علاوه بر کار الکتریکی و آب تولیدی، گرما محصول دیگر پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد.

در سیستم سوخت رسانی سمت آند پیل، هیدروژن فشار بالا که از مخزن سوخت وارد اجکتور می‌شود جریان اولیه نامیده می‌شود. درون اجکتور، جریان اولیه در نازل همگرا منبسط شده و انرژی پتانسیل فشاری به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود.



شکل ۱ ساختار سیستم تغذیه سوخت آند در پیل سوختی غشا پلیمری به همراه اجکتور

در نتیجه یک ناحیه کم فشار در داخل اجکتور به وجود

در این مقاله، تحلیل عددی جریان داخل اجکتور سیستم تغذیه سوخت پیل سوختی غشا پلیمری انجام شده و عملکرد اجکتور بررسی شده است. در این تحلیل، بر خلاف مدل‌هایی که تاکنون برای اجکتور پیل سوختی غشا پلیمری ارائه شده است، ابعاد پیل شامل: موقعیت خروجی، طول ناحیه اختلاط، طول دیفیوزر و زاویه قسمت واگرا بهینه می‌باشد و عملکرد اجکتور در تمامی حالت‌های عملیاتی و به صورت یک مدل تقارن محوری بررسی شده است. در ادامه، تأثیر پارامترهای عملکردی و هندسی شامل: افت فشار پیل، فشار و دمای عملکرد پیل که پارامترهایی به شدت تأثیرگذار بر عملکرد اجکتور و عملکرد توده پیل سوختی هستند و ابعاد هندسی اجکتور، بر عملکرد اجکتور مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نیز توان سیستم پیل سوختی با / بدون اجکتور محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- پیل سوختی غشا پلیمری

۲-۱- اصول کار سیستم تغذیه سوخت آند پیل

در سیستم‌های اخیر پیل‌های سوختی غشا پلیمری، به منظور تأمین کافی هیدروژن در لایه کاتالیست پیل و در نتیجه افزایش عملکرد سیستم، هیدروژن با نسبت استوکیومتریک بالاتر از ۱ برای توده پیل تأمین می‌شود. در واقع میزان هیدروژن ورودی بیشتر از میزان مصرف آن در پیل است و باقیمانده هیدروژن از پیل خارج شده که به خارج کردن آب و ناخالصی‌ها از توده پیل نیز کمک می‌کند. در سیستم‌های مرسوم، از کمپرسور جهت بازگرداندن هیدروژن مصرف نشده در پیل، به ورودی سمت آند پیل استفاده می‌شود و نسبت استوکیومتریک بالا، افت‌های پارازیتی ناشی از کمپرسور را افزایش می‌دهد و باعث کاهش راندمان کلی سیستم پیل سوختی می‌شود. با توجه به مرطوب بودن سوخت در خروج آند پیل، معایبی از جمله خوردگی مواد در کمپرسور، تماس سوخت با محل روغن کاری سیستم و آلوده شدن و در نتیجه کاهش واکنش در آند، کاهش کارایی کاتالیست و از بین بردن آن، از مشخصات سیستم با کمپرسور است. از نظر اقتصادی نیز، هزینه این سیستم نسبت به سیستم تغذیه سوخت توسط اجکتور بالاتر می‌باشد که این یکی از فاکتورهای طراحی پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد. در این مطالعه، مطابق شکل ۱،

می‌آید که باعث مکیده شدن خروجی آند پیل (جریان ثانویه) به داخل اجکتور می‌شود و سپس دو جریان با هم مخلوط شده و با فشاری کمتر از فشار جریان اولیه و فشاری بیشتر از فشار جریان ثانویه از اجکتور خارج شده و وارد مرطوب‌ساز می‌شوند [۱۷-۲۰].

مزایای اجکتور در خط جریان برگشتی سیستم سوخت رسانی پیل سوختی غشا پلیمری شامل موارد زیر می‌باشد.

- ۱- استفاده از انرژی پتانسیل فشاری هیدروژن مخزن سوخت،
- ۲- بازگشت دوباره هیدروژن مصرف نشده به آند پیل با افزایش راندمان استفاده از سوخت،
- ۳- کنترل رطوبت آند با بازگشت هیدروژن خروجی از آند، که این هیدروژن همراه با رطوبت بوده و بخشی از رطوبت پیل را تامین کرده و با کنترل آن به مدیریت آب در پیل کمک می‌شود.
- ۴- بالا بردن فشار جریان ثانویه به میزان فشار عملکردی آند پیل

۵- کاهش توان پارازیتی و افزایش راندمان خالص پیل

۶- کاهش هزینه ساخت و نگهداری سیستم عملکرد اجکتور معمولاً با پارامتر ω که نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه است ارزیابی می‌شود.

$$\omega = \frac{W_S}{W_P} \quad (1)$$

در این معادله، W_S دبی جرمی جریان ثانویه و W_P دبی جرمی جریان اولیه می‌باشد.

۲-۲- معادلات حاکم بر سیستم پیل سوختی

مدل پیل سوختی غشا پلیمری شامل دو بخش است. بخش اول شامل معادلات ترمودینامیکی برای محاسبه دما و دبی جرمی، و بخش دیگر شامل معادلات الکتروشیمیایی برای محاسبه ولتاژ و توان پیل سوختی می‌باشد. چون هدف اصلی این مقاله مطالعه عملکرد سیستم تغذیه سوخت به آند پیل می‌باشد، تنها قسمت آند پیل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

معادلات بقا جرم سمت آند از موازنه دبی ورودی، دبی خروجی و دبی مصرفی یا دبی تولیدی در سمت آند پیل به دست می‌آید.

معادله بقا هیدروژن:

$$W_{H_2,an,in} = W_{H_2,an,out} + W_{H_2,reacted} \quad (2)$$

که در آن، $W_{H_2,an,in}$ دبی جرمی هیدروژن ورودی به آند، $W_{H_2,an,out}$ دبی جرمی خروجی از آند و $W_{H_2,reacted}$ دبی جرمی هیدروژن مصرف شده در آند پیل سوختی است. معادله بقا آب:

$$W_{v,an,in} = W_{v,an,out} - W_{v,MEA} \quad (3)$$

$W_{v,an,in}$ دبی جرمی بخار آب ورودی آند، $W_{v,an,out}$ دبی جرمی بخار آب خروجی آند و $W_{v,MEA}$ دبی جرمی بخار آب تولید شده در آند پیل سوختی می‌باشد. دبی جرمی بخار آب ورودی آند می‌تواند به کمک معادله بقا جرم در مرطوب‌ساز به دست آید.

$$W_{v,an,in} = \frac{y_{v,hum}}{1 - y_{v,hum}} W_{H_2,an,in} \quad (4)$$

دبی جرمی هیدروژن ورودی به آند وابسته به عملکرد اجکتور است و با نوشتن معادله بقا جرم برای اجکتور مشخص می‌شود.

$$W_{H_2,an,in} = W_P + y_{H_2,an,out} W_S \quad (5)$$

که در آن، $y_{v,hum}$ درصد جرمی بخار آب در مرطوب‌ساز و $y_{H_2,an,out}$ درصد جرمی هیدروژن در آند می‌باشد. دبی جرمی جریان هیدروژن مصرف شده در آند از معادله زیر به دست می‌آید [۲۱].

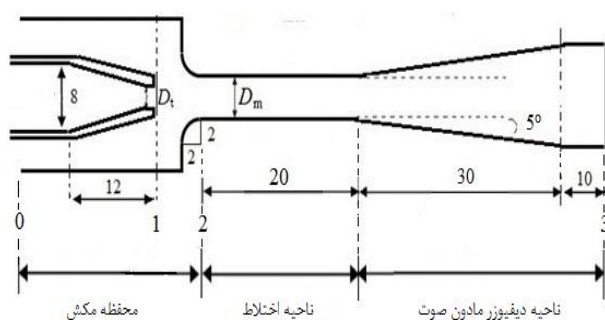
$$W_{H_2,reacted} = N_{cell} \frac{IMo_{H_2}}{2F} \quad (6)$$

که در آن، N_{cell} تعداد سل‌های توده پیل، Mo_{H_2} جرم مولکولی هیدروژن، I جریان الکتریکی و F ثابت فارادی است. دبی جرمی بخار آب منتقل شده از آند به غشا که ناشی از گرادیان فشار و نیروی درگ الکترو - اسمزیک است نیز به صورت زیر است [۲۲، ۲۳].

$$W_{v,MEA} = \alpha_{net} N_{cell} \frac{IMo_{H_2O}}{F} \quad (7)$$

که در آن، Mo_{H_2O} جرم مولکولی آب و α_{net} ضریب انتقال آب است که نسبت شار آب در پیل به شار یون می‌باشد. ولتاژ تک سل پیل سوختی غشاء پلیمری نیز از روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} + \eta_{diff} \quad (8)$$



شکل ۲ اجکتور نازل همگرا در سیستم تغذیه آند پیل

۳-۱- جریان اولیه

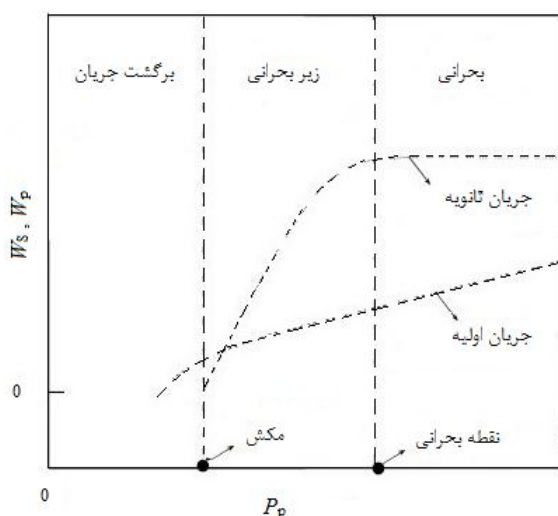
بر حسب ویژگی جریان در نازل همگرا، جریان به دو ناحیه جریان زیر صوتی و صوتی تقسیم می‌شود. ارتباط بین نسبت فشار، با دبی جرمی جریان به گونه‌ای است که نسبت فشار P_s/P_p که در واقع نسبت فشار جریان ثانویه به فشار جریان اولیه است طوری است که جریان به صوت نخواهد رسید مگر اینکه نسبت فشار ذکر شده کمتر از مقدار نسبت فشار بحرانی بیان شده در رابطه (۱۵) باشد.

$$v_{cr} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (15)$$

در این رابطه، k نسبت گرمای ویژه است.

۳-۲- جریان ثانویه

عملکرد اجکتور به طور کلی تحت تأثیر مشخصه‌های جریان در مقطع ۲ می‌باشد [۱۲].



شکل ۳ حالت‌های عملکردی اجکتور با نازل همگرا

در معادله ذکر شده E ولتاژ ترمودینامیکی در واکنش کلی پیل است که از معادله زیر به دست می‌آید [۲۴].

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T \ln [P_{H_2} (P_{O_2})^{0.5}] \quad (9)$$

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T_{cell} + \xi_3 T_{cell} \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T_{cell} \ln(I) \quad (10)$$

$$\eta_{ohmic} = -I.R^{internal} \quad (11)$$

$$\eta_{diff} = m \exp(nI) \quad (12)$$

در معادلات بالا، C_{O_2} غلظت اکسیژن می‌باشد و ضرایب $\xi_1 - \xi_4$ ، m و n در مرجع [۲۴] موجود است.

همچنین، راندمان استفاده از سوخت به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$\eta_c = \frac{W_s}{W_B} \quad (13)$$

در سیستم‌هایی که در عوض اجکتور از کمپرسور استفاده می‌کنند، توان کمپرسور بر اساس قانون قاول ترمودینامیک و با فرض کمپرسور آدیاباتیک، مشخص می‌شود.

$$W_{com} = \eta_{com} (w_{H_2, an, out} + w_{v, an, out}) (h_{in} - h_{out}) \quad (14)$$

در رابطه بالا، η_{com} راندمان کمپرسور است.

۳- مدل اجکتور

مطابق شکل ۲، در سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری، یک اجکتور با نازل همگرا به کار رفته است که این اجکتور از سه قسمت، محفظه مکش، ناحیه اختلاط و دیفیوژر مادون صوت تشکیل شده است. مقطع شماره ۱ محل خروجی نازل همگرا، مقطع شماره ۲ شروع ناحیه اختلاط و مقطع شماره ۳ نیز خروجی اجکتور را نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بر حسب مشخصه‌های جریان ثانویه، عملکرد اجکتور به سه حالت عملیاتی: برگشت جریان، زیر بحرانی و بحرانی تقسیم می‌شود. در شکل ۳ شروع مکش و نقطه بحرانی که بین حالت بحرانی و زیر بحرانی قرار دارد نیز نشان داده شده است. دبی جریان ثانویه در حالت زیر بحرانی به دلیل اینکه بین دو حالت برگشت جریان و بحرانی قرار دارد بسیار حساس می‌باشد و در حالت بحرانی دبی جریان ثانویه تقریباً ثابت می‌شود.

- ۴- دمای جریان اولیه و همچنین جریان ثانویه درون اجکتور در جهت شعاعی به طور یکنواخت توزیع شده است.
 - ۵- فشار جریان اولیه و ثانویه درون اجکتور در جهت شعاعی به طور یکنواخت توزیع شده است.
 - ۶- پروفیل سرعت جریان ثانویه درون اجکتور در جهت شعاعی غیر یکنواخت و لایه مرزی در نزدیکی دیواره‌های اجکتور وجود دارد.
 - ۷- از تأثیر گرانش صرف نظر می‌شود.
 - ۸- روابط آیزنتروپیک با در نظر گرفتن افت‌های اصطکاکی به کار می‌رود.
 - ۹- از تغییر فاز (بخار به آب مایع) صرف نظر می‌شود.
- معادلات حاکم بر مدل شامل معادلات بقا جرم، مومنتم، انرژی و معادله حالت می‌باشد که با در نظر گرفتن فرضیات بالا حل می‌شوند.

۳-۴- معادلات حاکم

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (16)$$

در این معادله، u سرعت و ρ چگالی مخلوط گاز می‌باشد.

معادله بقا مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (17)$$

$$\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (18)$$

p و τ_{ij} به ترتیب فشار و تانسور تنش مخلوط گاز و μ_{eff}

ویسکوزیته دینامیکی مؤثر می‌باشد.

معادله انرژی کل:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i (\rho E + P) \right) = \nabla \cdot \left(K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i (\tau_{ij}) \right) \quad (19)$$

E انرژی کل، K_{eff} ضریب هدایت گرمایی مؤثر و T دما است.

به منظور ارتباط دما، فشار و چگالی از معادله حالت گاز کامل استفاده می‌شود.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (20)$$

R ثابت گاز می‌باشد.

در این مقطع یک لایه اختلاط وجود دارد که دو جریان اولیه و ثانویه را از هم جدا نموده است. جریان ثانویه بیرون از این لایه، توزیع سرعت غیر خطی دارد که ناشی از لزجت و اغتشاش سیال می‌باشد و در شکل ۴ نشان داده شده است.

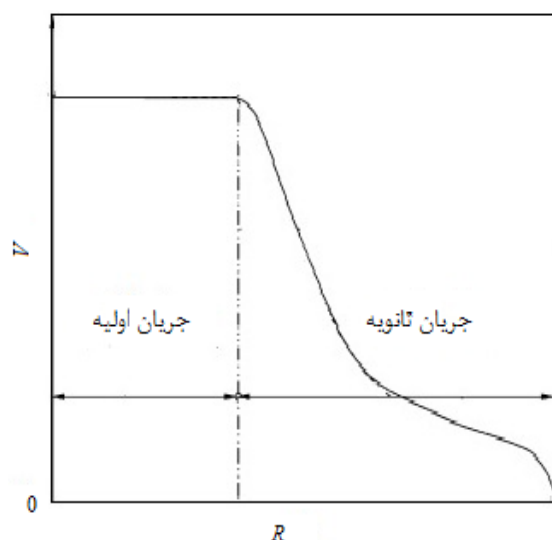
در مدل‌های رایج یک بعدی اجکتور، توزیع سرعت هر دو جریان به صورت یکنواخت می‌باشد و آشکار است که این مدل خوبی برای ارزیابی اجکتور نیست. به این نکته هم باید توجه داشت که توزیع سرعت در اجکتور نازل همگرا با توزیع سرعت در اجکتور نازل همگرا - واگرا، سرعت جریان اولیه در اجکتور نازل همگرا نسبت به نازل همگرا - واگرا پایین‌تر است. بنابراین نسبت به نازل همگرا - واگرا، جریان اولیه نمی‌تواند به جریان ثانویه شتاب دهد و به همین دلیل توزیع سرعت جریان ثانویه به صورت مقعر می‌باشد.

۳-۳- فرضیات

۱- به منظور ساده کردن حل معادلات حاکم، یک مدل تقارن محوری برای تحلیل جریان درون اجکتور در نظر گرفته شده است و با دیگر فرضیات مناسب زیر مسأله ساده‌سازی شده است.

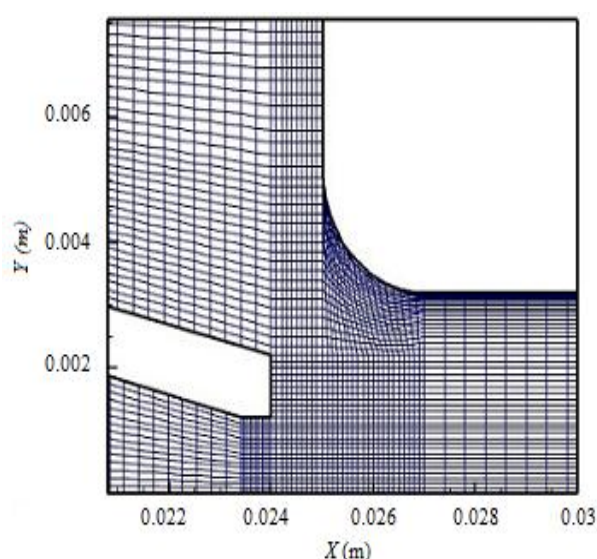
۲- جریان اولیه و مخلوط گازهای جریان ثانویه گاز کامل هستند.

۳- جریان دائم است.

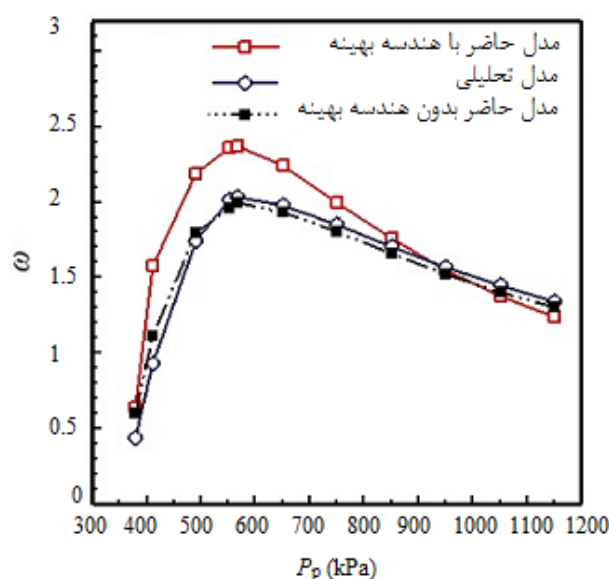


شکل ۴ توزیع سرعت در مقطع ۲

شود. برای اطمینان از صحت مدل سازی، نسبت دبی جریان ثانویه به جریان اولیه در فشارهای مختلف جریان اولیه، با نتایج تحلیلی موجود در مرجع [۳] مقایسه شده و در شکل ۶ ارائه گردیده است. بدین منظور، هندسه در نظر گرفته شده مشابه مرجع [۳] با ابعاد نشان داده شده در شکل ۲، می باشد. همچنین شرایط عملکردی اجرای ارزیابی مدل حاضر با آنچه در مرجع [۳] آمده یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. مش بندی اجکتور، هندسه متقارن



شکل ۶. تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه بر حسب فشار جریان اولیه: مقایسه نتایج تحلیلی [۳] و مطالعه حاضر

۴- شرایط مرزی و روش عددی

هیدروژن خالص، جریان اولیه در اجکتور است؛ در حالی که جریان ثانویه ترکیبی از هیدروژن و بخار آب می باشد. فشار و دمای جریان اولیه و جریان ثانویه به عنوان فشار و دمای ورودی می باشد و فشار عملکردی پیل در سمت آند به عنوان فشار خروجی اجکتور و درصد جرمی بخار آب در خروجی آند پیل، برای جریان ثانویه در نظر گرفته شده است.

برای بررسی عملکرد اجکتور در سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری، چند هندسه مختلف ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است و نسبت دبی جریان ثانویه به دبی جریان اولیه و دمای خروجی اجکتور با شرایط مرزی یکسان محاسبه و مقایسه شده است. در آخر نیز تأثیر نسبت قطر ناحیه قطر ثابت به قطر نازل همگرا را بر عملکرد اجکتور نشان داده شده است. مشخصات عملکردی و پارامترهای هندسی اجکتور در جدول ۱ آورده شده است.

معادلات حاکم بر اجکتور توسط نرم افزار فلوئنت همراه با شرایط مرزی معین حل شده اند. در این مدل، میدان های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل سی به دست آمده اند. از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ RNG به دلیل اینکه دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل های اغتشاشی دارد استفاده شده است. برای حل معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت 10^{-6} ادامه پیدا کرده است.

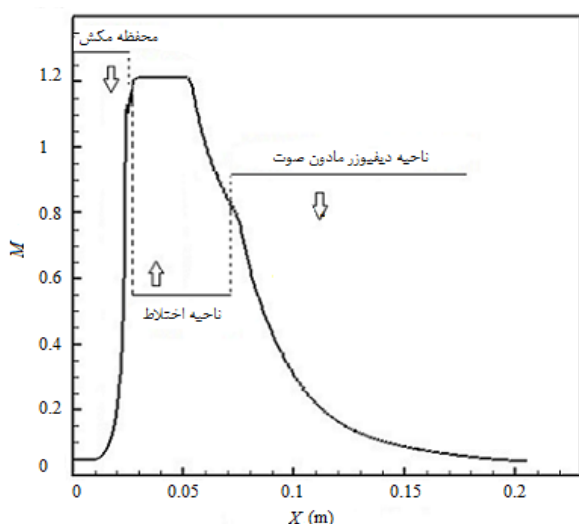
از شبکه بندی مستطیلی با اندازه متغیر در اجکتور استفاده شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. تعداد شبکه استفاده شده در مدل مرجع، ۲۲۵۹۲ بوده است. مطالعه شبکه انجام شده و تعداد گره ها طوری تنظیم شده است که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه باشد. این کار بدین صورت بوده که با تغییر تعداد گره ها مقدار دبی خروجی در فشار ثابت تغییراتی در حد دقت انتخابی داشته است.

۵- نتایج و بحث

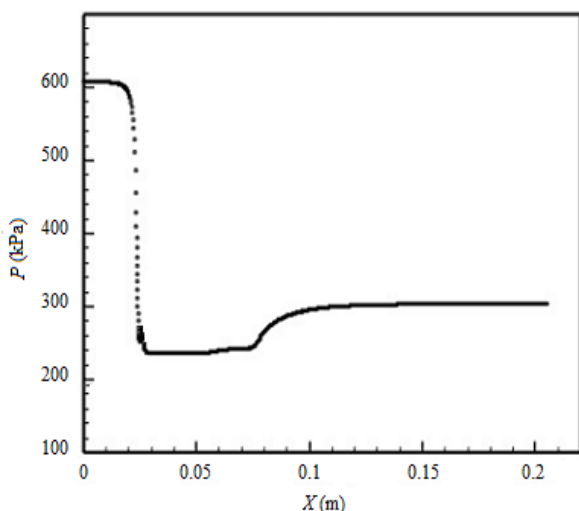
۵-۱- صحت گذاری نتایج

نتایج ارائه شده در مقالات، بر اساس هندسه غیر بهینه اجکتور می باشد و صحت گذاری نتایج می تواند بر اساس این پارامترهای هندسی غیر بهینه که در مراجع موجود است، انجام

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودار عدد ماخ و فشار استاتیکی در طول محور تقارن اجکتور نشان داده شده است. در ابتدای اجکتور که ورود جریان اولیه می‌باشد، فشار زیاد می‌باشد. در نتیجه سرعت پایین است و به محض ورود جریان اولیه به نازل همگرا، فشار کاهش یافته و سرعت افزایش می‌یابد و عدد ماخ نیز افزایش می‌یابد. در محفظه مکش که جریان اولیه و ثانویه با هم مخلوط می‌شوند، جریان ثانویه نیز در کنار دیواره اجکتور سرعت می‌گیرد و مخلوط جریان نیز در ناحیه اختلاط با کاهش عدد ماخ که شوک ایجاد می‌شود مواجه شده و جریان با عدد ماخ کمتر از یک، وارد ناحیه دیفیوزر مادون صوت می‌شود که منجر به کاهش سرعت و افزایش فشار می‌شود.



شکل ۷ تغییرات عدد ماخ در طول خط تقارن اجکتور



شکل ۸ تغییرات فشار استاتیکی جریان اولیه در طول خط تقارن اجکتور

نتایج تطابق خوبی با هم دارند و مقدار ماکزیمم نسبت دبی در مدل عددی در فشار ۵۷۰ کیلو پاسکال برابر ۱/۹۷ و در مدل تحلیلی برابر ۲ است.

همچنین بر اساس هندسه بهینه، نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه در فشارهای مختلف جریان اولیه، در این شکل رسم شده است. مشاهده می‌شود که با تغییر ابعاد و بهینه شدن آنها ماکزیمم نسبت دبی به ۲/۳۷ می‌رسد که نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد ابعاد هندسی بر عملکرد اجکتور و اهمیت استفاده از اجکتور با ابعاد بهینه می‌باشد. نتایج ارائه شده در قسمت‌های آتی بر اساس هندسه با ابعاد بهینه می‌باشد که این ابعاد همراه با مشخصات عملکردی سیستم پیل سوختی در جدول ۱ ارائه شده است.

۵-۲- عملکرد اجکتور

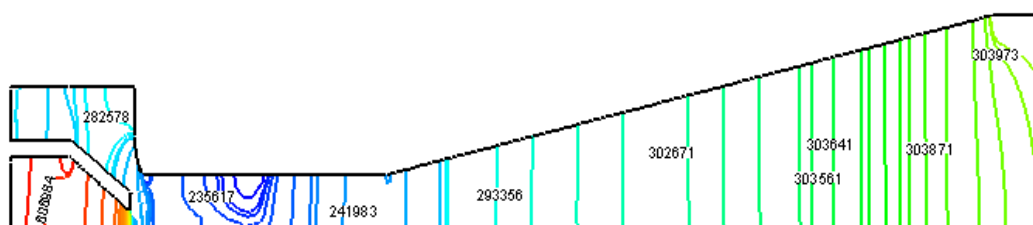
نمودار فشار استاتیکی و نمودار عدد ماخ در طول خط تقارن اجکتور و همچنین کانتورهای فشار، غلظت هیدروژن، غلظت بخار آب و خطوط جریان مطابق با پارامترهای هندسی اجکتور ۲ (با مشخصات بیان شده در جدول ۱)، در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ شرایط عملکردی و پارامترهای هندسی اجکتور بهینه

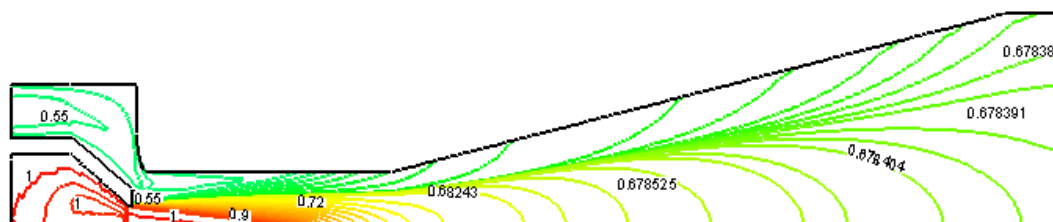
پارامتر	واحد	مقدار
فشار جریان اولیه	کیلوپاسکال	۶۰۰
فشار جریان ثانویه	کیلوپاسکال	۲۸۰
فشار عملکرد پیل	کیلوپاسکال	۳۰۰
طول ناحیه اختلاط	میلی‌متر	۳۸/۴
طول دیفیوزر مادون صوت	میلی‌متر	۱۱۰
زاویه واگرایی	درجه	۳
قطر نازل اجکتور ۱	میلی‌متر	۲/۱
قطر نازل اجکتور ۲	میلی‌متر	۲/۴
قطر نازل اجکتور ۳	میلی‌متر	۲/۸
قطر ناحیه قطر ثابت اجکتور ۱	میلی‌متر	۵/۲
قطر ناحیه قطر ثابت اجکتور ۲	میلی‌متر	۶/۴
قطر ناحیه قطر ثابت اجکتور ۳	میلی‌متر	۸
نسبت قطر ناحیه اختلاط به قطر نازل اجکتور ۱	-	۲/۴۸
نسبت قطر ناحیه اختلاط به قطر نازل اجکتور ۲	-	۲/۶۷
نسبت قطر ناحیه اختلاط به قطر نازل اجکتور ۳	-	۲/۸۶
دمای عملکرد پیل	کلوین	۳۵۳
دمای جریان اولیه	کلوین	۲۹۸
درصد جرمی بخار آب در خروجی آند	-	۰/۴۵

از مقدار درصد جرمی اولیه آن کمتر شده و با پیش رفتن به سمت خروجی اجکتور، غلظت بخار آب افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۱ خطوط جریان در اجکتور، در مقطعی شامل بخش محفظه اختلاط و ناحیه قطر ثابت ترسیم شده است. در این شکل نحوه اختلاط دو جریان اولیه و ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده نشان داده شده است. از نحوه اختلاط جریان داخل محفظه مکش اجکتور مشخص است که طراحی هندسه اجکتور از نظر فاصله بین نازل و ناحیه اختلاط که باعث افزایش عملکرد اجکتور می‌شود بایستی مد نظر قرار گیرد که در این مقاله از مقدار بهینه استفاده شده است.

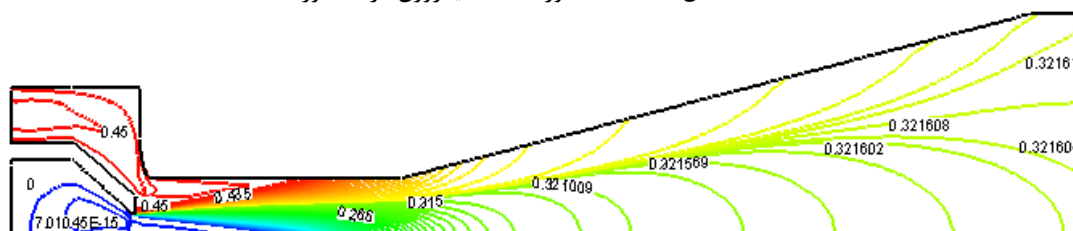
تغییر جزئی فشار در ناحیه اختلاط اجکتور ناشی از شوک ایجاد شده می‌باشد که باعث افزایش فشار می‌شود. در شکل ۹ نیز کانتور فشار استاتیکی در اجکتور نمایش داده شده است. در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب کانتورهای غلظت هیدروژن و بخار آب نشان داده شده است. ورودی جریان اولیه تنها شامل هیدروژن است؛ در حالی که ورودی جریان ثانویه مخلوط هیدروژن و بخار آب می‌باشد که با مخلوط شدن جریان ثانویه و اولیه در امتداد خط تقارن اجکتور، غلظت هیدروژن کاهش می‌یابد. در شکل ۱۰-ب کانتور غلظت بخار آب نشان داده شده است. با مخلوط شدن دو جریان ثانویه و اولیه، غلظت بخار آب



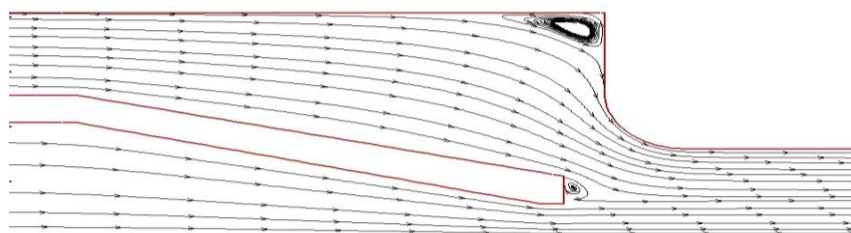
شکل ۹ کانتور فشار استاتیکی در اجکتور



شکل ۱۰-الف کانتور غلظت هیدروژن در اجکتور

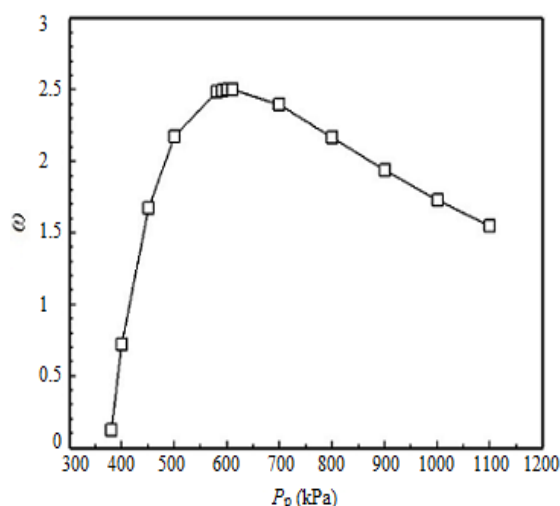


شکل ۱۰-ب کانتور غلظت بخار آب در اجکتور

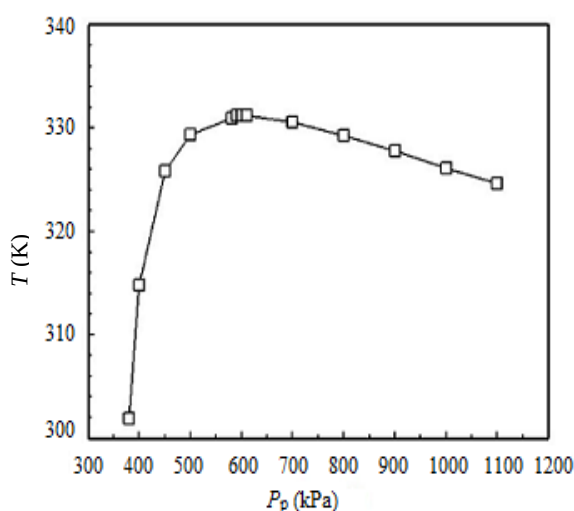


شکل ۱۱ خطوط جریان در مقطعی از اجکتور: بخش محفظه اختلاط و ناحیه قطر ثابت

مرطوب‌ساز می‌شود نیز تکرار می‌شود و دقیقاً در همان فشاری که نسبت دبی جرمی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد دمای خروجی اجکتور نیز بیشینه خواهد شد.



شکل ۱۳ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه در فشارهای مختلف جریان اولیه



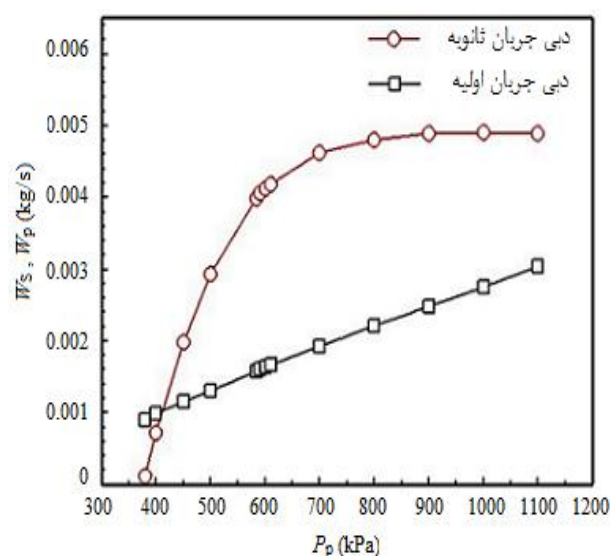
شکل ۱۴ تغییرات دمای جریان خروجی اجکتور در فشارهای مختلف جریان اولیه

۵-۳- تأثیر افت فشار سمت آند بر عملکرد اجکتور

به دلیل افت فشار به وجود آمده در مرطوب‌ساز و افت فشار در توده پیل با توجه به شکل کانال‌های جریان (موازی یا مارپیچی)، برای دوباره باز گرداندن سوخت، از اجکتور استفاده می‌شود که این مقادیر افت فشار با توجه به نوع کانال‌های پیل

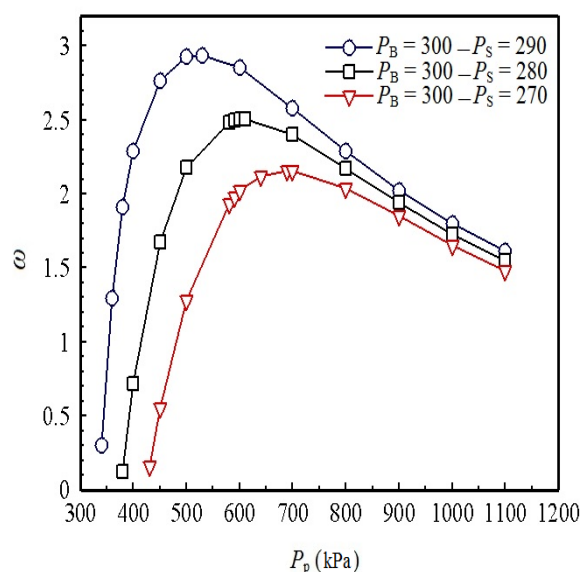
تغییرات دبی جریان ثانویه و جریان اولیه در حالت‌های مختلف عملکرد اجکتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. دبی جریان اولیه یعنی جریانی که از مخزن سوخت وارد اجکتور می‌شود، با افزایش فشار جریان اولیه به طور خطی افزایش می‌یابد؛ اما دبی جریان ثانویه یعنی جریانی که خروجی آند می‌باشد، از زمان راه‌اندازی که اجکتور در حالت کارکرد برگشت جریان است، با افزایش فشار جریان اولیه از مقدار صفر افزایش یافته که در این حالت اجکتور در کارکرد زیر بحرانی قرار دارد. وقتی فشار به حدی می‌رسد که دبی جریان ثانویه تقریباً ثابت می‌شود این حالت بحرانی اجکتور می‌باشد. با افزایش بیشتر فشار اولیه، دبی جریان ثانویه و در نتیجه کارایی اجکتور پایین می‌آید.

نمودارهای نسبت دبی جریان ثانویه به دبی جرمی جریان اولیه و دمای خروجی اجکتور به ازای فشارهای مختلف جریان اولیه، در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳، با افزایش فشار جریان اولیه، نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به دبی جرمی جریان اولیه افزایش یافته تا اینکه در شروع حالت بحرانی، این نسبت دبی جرمی به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. با افزایش بیشتر فشار، این نسبت دبی کاهش می‌یابد که باعث کاهش کارایی سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری می‌شود.

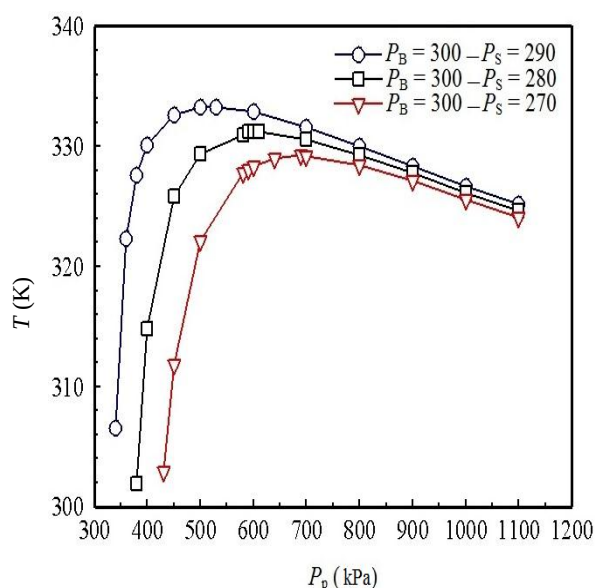


شکل ۱۲ تغییرات دبی جریان ثانویه و جریان اولیه در فشارهای مختلف جریان اولیه

این روند در مورد دمای خروجی اجکتور که وارد



شکل ۱۵ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه در افت فشارهای مختلف



شکل ۱۶ تغییرات دمای خروجی اجکتور در افت فشارهای مختلف

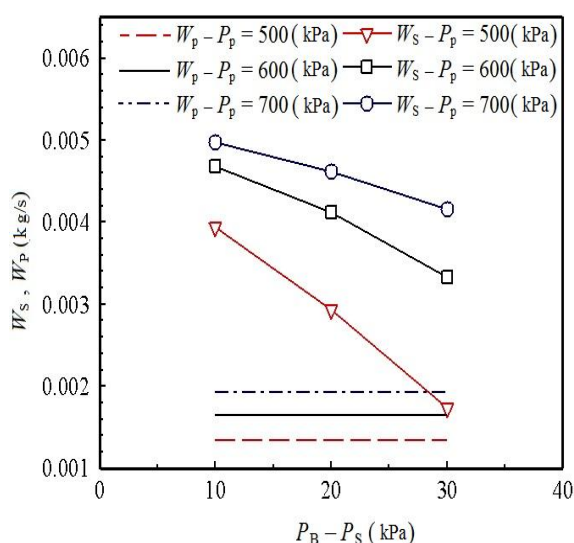
به عبارتی، علاوه بر نسبت دبی ماکزیمم در فشار جریان اولیه پایین‌تر، دمای جریان خروجی بالاتری نیز در این فشار به دست می‌آید که به دمای عملکرد پیل نزدیک‌تر خواهد بود. باید توجه داشت که در همه ولتاژهای خروجی پیل، با افزایش دما، عملکرد پیل افزایش می‌یابد. در دانسیته جریان‌های پایین، عملکرد بهتر پیل در دماهای بالا ناشی از افزایش دانسیته جریان تبادل و نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌باشد. در

سوختی و مرطوب‌ساز پلیمری متفاوت می‌باشد. افت فشار در کانال‌های موازی بسیار کمتر از کانال‌های مارپیچی می‌باشد. به منظور پوشش دادن همه انواع کانال‌ها و افت فشار ایجاد شده توسط آنها، در این بخش تأثیر مقادیر مختلف افت در توده پیل و مرطوب‌ساز بر عملکرد اجکتور بررسی شده است. مقادیر کوچک‌تر افت فشار می‌تواند مربوط به مرطوب‌ساز و توده پیل با کانال‌های موازی و مقادیر بزرگ‌تر مربوط به مرطوب‌ساز و توده پیل با کانال‌های مارپیچی باشد. باید توجه داشت که عوامل دیگری از جمله منیفولد ورودی، منیفولد خروجی، مسیر هدایت هیدروژن و ... نیز بر افت فشار تأثیرگذار می‌باشند. با توجه به افت فشارهای گزارش شده در مقالات [۳]، در این مطالعه افت فشارهای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ بار در نظر گرفته شده است تا تأثیر این افت فشارها بر عملکرد اجکتور نشان داده شود. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تأثیر اختلاف بین فشار خروجی و فشار جریان ثانویه اجکتور بر عملکرد و دمای خروجی اجکتور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش این اختلاف فشار که بیشتر ناشی از افت فشار در کانال گاز سمت آند می‌باشد، عملکرد اجکتور در فشارهای اولیه پایین‌تر، بسیار بهتر خواهد بود. کاهش اختلاف فشار باعث می‌شود که در فشار اولیه پایین‌تر به بیشترین مقدار نسبت دبی جرمی ثانویه به دبی جرمی جریان اولیه دست یابیم. ماکزیمم نسبت دبی برای افت فشارهای ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ بار به ترتیب برابر ۲/۵۰، ۲/۹۴ و ۱/۹۷ می‌باشد. در افت فشار ۰/۱ بار، اجکتور در فشار بحرانی ۵/۳ بار به حداکثر نسبت دبی می‌رسد؛ در حالی که فشار بحرانی برای افت فشار ۰/۳ بار برابر ۶/۹ بار است. طراحی سیستم تغذیه آند پیل باید به گونه‌ای باشد که برای رسیدن به شرایط مطلوب عملکرد سیستم، از فشار اولیه پایین‌تر استفاده شود. این امر توان پارازیتی سیستم را کاهش می‌دهد. از این رو، افت فشار پایین‌تر پیل علاوه بر این که نسبت دبی اجکتور را افزایش می‌دهد، فشار اولیه بحرانی را نیز کاهش می‌دهد که منجر به کاهش توان تلفاتی سیستم پیل سوختی می‌شود.

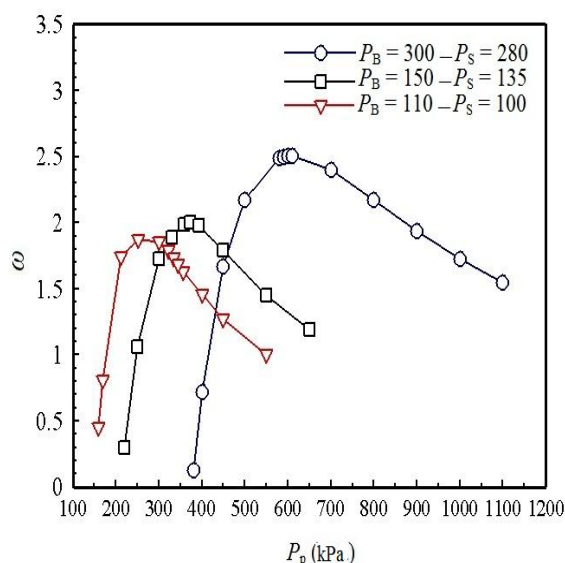
مطابق شکل ۱۶، مزیت افزایش نسبت دبی اجکتور در اثر کاهش افت فشار، همچنین باعث می‌شود که دمای خروجی بالاتری از اجکتور که مطلوب پیل سوختی نیز است تأمین شود. دمای خروجی از اجکتور در نقاط بحرانی ۵/۳، ۶/۰ و ۶/۹ بار به ترتیب برابر ۳۳۳/۳، ۳۳۱/۳ و ۳۲۹/۲ کلوین است.

افزایش می‌یابد. اما برای بالا بردن فشار، درصدی از توان پیل در کمپرسور مصرف می‌شود. زمانی که فشار عملکرد پیل افزایش می‌یابد، مدیریت آب نیز به توان بیشتری نیاز دارد.

در شکل ۱۸ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به دبی جرمی جریان اولیه و در شکل ۱۹ تغییرات دمای خروجی اجکتور بر حسب فشار جریان اولیه در سه نوع فشار عملکردی پیل با افت فشارهای متفاوت [۳]، نشان داده شده است.



شکل ۱۷ تغییرات دبی جرمی جریان ثانویه و جریان اولیه به ازای افت فشارهای متفاوت



شکل ۱۸ تغییرات دبی جرمی جریان ثانویه و جریان اولیه به ازای سه فشار عملکردی پیل

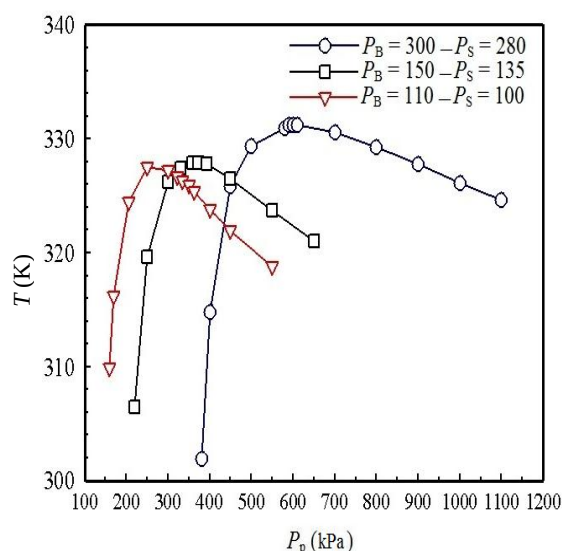
دانشیته جریان‌های متوسط که افت‌های مهمی در پیل سوختی غالب هستند، با افزایش دما هدایت یونی غشا افزایش یافته و عملکرد پیل بهبود می‌یابد. در دانشیته جریان‌های بالا نیز افزایش دما باعث بالا رفتن فشار بخار می‌شود که این امر مانع تاثیر منفی شناوری بر عملکرد پیل می‌شود. باید توجه داشت که در دماهای خیلی بالا (مانند ۹۰ درجه سلسیوس) نیز اگر چه افزایش دمای عملکرد پیل می‌تواند افت‌های انتقالی را کاهش دهد و نرخ واکنش‌های الکتروشیمیایی را افزایش دهد، اما افزایش دما می‌تواند پتانسیل پیل را به دلیل افزایش فشار جزئی بخار آب و خشک شدن غشا کاهش دهد. خشک شدن باعث پایین آمدن رسانایی یونی می‌شود و تنش‌های حرارتی نیز در این حالت زیاد شده و می‌تواند گسیختگی غشا را به همراه داشته باشد. به همین دلیل دمای بهینه پیل سوختی حدود ۸۰ درجه سلسیوس است و در این مطالعه نیز این دما به عنوان دمای عملکرد پیل انتخاب شده است.

علاوه بر مزیت فوق، علاقه‌مند هستیم که فشار جریان برگشتی یعنی فشاری که جریان ثانویه از آند پیل بازگردانده می‌شود پایین‌تر باشد. از نتایج به دست آمده در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که با کاهش اختلاف بین فشار جریان خروجی و جریان ثانویه در اجکتور، فشار جریان برگشتی پایین‌تر خواهد بود. بنابراین طراحی خوب کانال گاز سمت آند تأثیر به سزایی بر عملکرد اجکتور دارد.

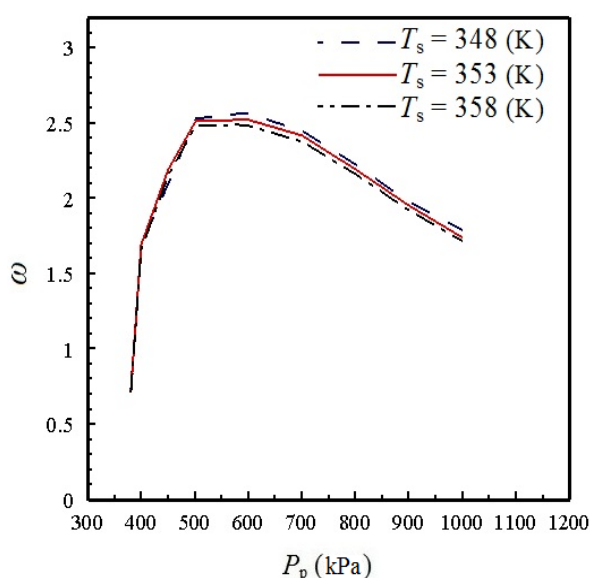
در شکل ۱۷ تغییرات دبی جرمی جریان ثانویه و جریان اولیه به ازای افت فشارهای متفاوت در چند فشار جریان اولیه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که دبی جرمی جریان ثانویه با افزایش افت فشار بین ورودی و خروجی سمت آند کاهش یافته و این تغییرات در حالت زیر بحرانی نسبت به حالت بحرانی شدیدتر می‌باشد. در تمامی فشارهای جریان اولیه، این افت فشار تأثیری بر دبی جریان اولیه ندارد.

۴-۵- تأثیر فشار عملکرد پیل سوختی بر عملکرد اجکتور

یک پیل سوختی هم می‌تواند در فشار محیط عمل کند و هم می‌تواند فشار گذاری شود و در فشاری بالاتر از فشار محیط کار کند. زمانی که فشار عملکرد پیل افزایش می‌یابد، عملکرد پیل بهبود یافته و در یک دانشیته جریان مشخص، ولتاژ پیل



شکل ۱۹ تغییرات دمای خروجی اجکتور به ازای سه فشار عملکردی پیل



شکل ۲۰ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه بر حسب فشار جریان اولیه برای دماهای مختلف جریان ثانویه

۵-۶- تأثیر نسبت قطر ناحیه اختلاط به قطر نازل اجکتور بر کارایی سیستم تغذیه سوخت آند

در شکل ۲۱ تأثیر نسبت قطر ناحیه قطر ثابت به قطر نازل همگرا در اجکتور (β_D) بر نسبت دبی نشان داده شده است. مشخصات هندسی این سه اجکتور در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت قطر، نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به جریان اولیه بیشتر خواهد شد و ماکزیمم دبی، در فشار جریان اولیه بالاتر می‌باشد.

با افزایش فشار عملکرد پیل، نسبت دبی جرمی افزایش می‌یابد؛ هر چند که فشار متناظر با ماکزیمم نسبت دبی یعنی فشار شروع حالت بحرانی نیز افزایش می‌یابد. دمای خروجی اجکتور نیز با افزایش فشار عملکرد پیل افزایش می‌یابد که در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مقادیر ماکزیمم نسبت دبی جرمی متناظر با فشارهای عملکرد ۳، ۱/۵ و ۱/۱ بار، برابر ۲/۵، ۲/۰ و ۱/۹ است. مقادیر دمای خروجی متناظر با فشارهای عملکرد بیان شده نیز به ترتیب ۳۲۷ و ۳۲۸، ۳۳۳ و ۳۲۷ کلوین می‌باشد.

اگر چه افت فشار در سه حالت مختلف فشار عملکرد پیل متفاوت است و با افزایش فشار عملکرد پیل، افت فشار بیشتر می‌شود؛ اما همان طور که در بخش ۵-۳ بیان شد، افت فشار بیشتر سبب کاهش عملکرد اجکتور خواهد شد. اما مطابق شکل ۱۸، در فشار عملکرد بالا، با افت بیشتر فشار در کانال سوخت آند باز هم عملکرد اجکتور بهتر است. بنابراین باید با توجه به شرایط پیل و توانی که از پیل می‌خواهیم نتایج با یکدیگر مقایسه شود و بهترین فشار عملکردی با افت فشار مشخص برای سیستم تغذیه سوخت آند انتخاب شود.

دبی جرمی جریان ثانویه در اجکتور، با افزایش افت فشار در سمت آند پیل کاهش می‌یابد که این روند برای فشارهای متفاوت جریان اولیه اجکتور روی می‌دهد و بیشترین تأثیر در حالت عملکردی زیر بحرانی اجکتور می‌باشد؛ در حالی که تغییرات افت فشار بر جریان اولیه اجکتور تأثیری نمی‌گذارد.

۵-۵- تأثیر دمای عملکرد پیل سوختی بر کارایی سیستم تغذیه سوخت آند

در شکل ۲۰ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه بر حسب فشار جریان اولیه، برای دماهای مختلف جریان ثانویه نشان داده شده است. با تغییر دمای جریان ثانویه، فشار حالت بحرانی عملکرد اجکتور یعنی فشار متناظر با بیشترین نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به دبی جرمی جریان اولیه، تغییر چندانی نخواهد کرد. مقادیر ماکزیمم نسبت دبی در دماهای عملکرد ۳۴۸، ۳۵۳ و ۳۵۸ کلوین به ترتیب برابر ۲/۵۲، ۲/۵ و ۲/۴۸ می‌باشد. مقادیر نسبت دبی ماکزیمم در دماهای عملکردی مختلف پیل همه در فشار بحرانی ۶ بار می‌باشند. این مقادیر نشان می‌دهند که دمای عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری تأثیر چندانی بر عملکرد اجکتور ندارد.

به کمپرسور یا جریان ثانویه اجکتور است.)، به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۹ و ۰/۰۰۴۳ کیلو گرم بر ثانیه است. مطابق با روابط ۲ تا ۶، با این مقادیر دبی، در واقع جریان توده پیل ۴۰۵ آمپر می‌باشد. توان مورد نیاز کمپرسور با فرض راندمان ۰/۶۵، برای افزایش فشار از ۲۸۰ به ۳۰۰ کیلو پاسکال و با دبی ۰/۰۰۴۳ کیلوگرم بر ثانیه، طبق رابطه ۱۴، برابر ۶۵۰/۸ وات است. برای محاسبه ظرفیت حرارتی مخلوط هیدروژن و بخار آب، نسبت جرمی بخار آب ۴۵ درصد لحاظ شده است.

ولتاژ تک سل پیل سوختی غشا پلیمری نیز بر اساس روابط ۸ تا ۱۲، برابر ۰/۳۹ به دست می‌آید. تعداد توده پیل ۳۸۱ عدد بوده و با توجه به ولتاژ تک سل و جریان پیل، توان توده پیل برابر ۶۰۱۷۹ وات است. از این مقدار توان، ۶۵۰/۸ وات در کمپرسور مصرف می‌شود.

راندمان استفاده از سوخت با اجکتور نیز بر اساس رابطه ۱۳، برابر ۷۳٪ می‌باشد.

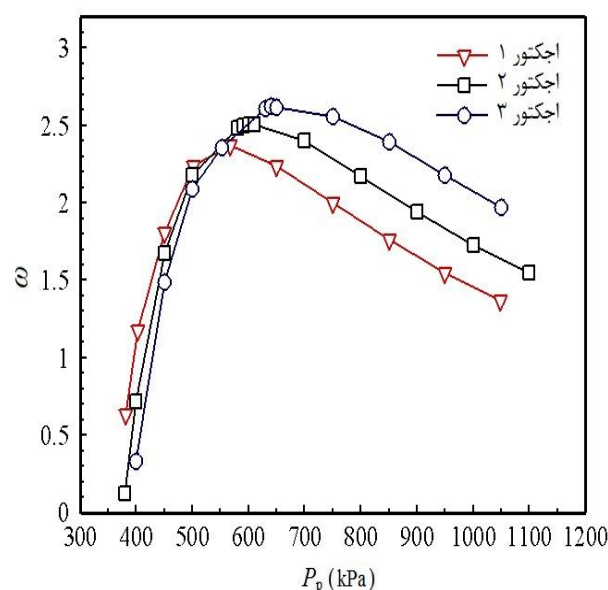
۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری با استفاده از اجکتور نازل همگرا بررسی شده و تأثیر پارامترهای چون افت فشار در کانال سوخت سمت آند، فشار عملکرد پیل، دمای عملکرد پیل و مشخصات هندسی اجکتور بر عملکرد اجکتور مطالعه شده است. دستاوردهای مطالعه بدین قرار می‌باشد.

۱- سادگی طراحی، قابلیت اعتماد بالا، قیمت پایین و نداشتن قسمت متحرک به دلیل استفاده از اجکتور در عوض کمپرسور در سیستم پیل سوختی غشا پلیمری این سیستم را گزینه‌ای جذاب‌تر از دیگر سیستم‌ها برای تغذیه سوخت آند پیل می‌کند و به کاهش توان پارازیتی (حدود ۶۵۰/۸ وات در یک پیل با توان ۶۰۱۷۹ وات) کمک می‌کند.

۲- با بازگرداندن سوخت مصرف نشده به آند توسط اجکتور، راندمان استفاده از سوخت افزایش می‌یابد.

۳- افزایش فشار جریان اولیه باعث افزایش دبی جریان ثانویه خواهد شد. این افزایش فشار جریان اولیه تا زمانی که اجکتور در حالت زیر بحرانی کار می‌کند، باعث افزایش جریان ثانویه می‌شود. به محض ورود به حالت بحرانی، دبی جریان ثانویه ثابت خواهد ماند. بنابراین طراحی اجکتور باید به گونه‌ای



شکل ۲۱ تغییرات نسبت دبی جرمی جریان ثانویه بر حسب فشار جریان اولیه برای هندسه‌های مختلف جریان ثانویه

این بدین معنی است که برای رسیدن به حالت عملکرد بحرانی در اجکتور، باید فشار مخزن سوخت افزایش یابد. مطابق شکل، در حالت عملکرد زیر بحرانی، در هر فشار اولیه مشخص، با کاهش نسبت قطر نسبت دبی متناظر با آن، افزایش است. اما، در حالت عملکرد بحرانی اجکتور، با افزایش نسبت قطر، نسبت دبی نیز افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش نسبت قطر از ۲/۴۸ به ۲/۸۶، نسبت دبی بیشینه از ۱/۹۷ به ۲/۶۲ افزایش می‌یابد.

۵-۷- تأثیر اجکتور بر عملکرد سیستم پیل سوختی

برای این که تأثیر اجکتور بر عملکرد و راندمان کلی سیستم پیل سوختی غشا پلیمری بررسی شود، سیستم همراه با اجکتور با سیستم بدون اجکتور (استفاده از کمپرسور برای بازگرداندن هیدروژن و رطوبت خروجی آند) از نظر توان و راندمان مصرف سوخت مقایسه می‌گردند. مقایسه در نقطه حداکثر دبی خروجی از آند انجام می‌شود و مشخصات پیل به صورت: فشار جریان اولیه برابر ۶۰۰ کیلو پاسکال، فشار جریان ثانویه برابر ۲۸۰ کیلو پاسکال، فشار و دمای عملکرد پیل ۳۰۰ کیلو پاسکال و ۸۰ درجه سلسیوس، تعداد سل‌ها ۳۸۱ است.

در فشار متناظر با ماکزیمم نسبت دبی، دبی جریان سوخت ورودی و خروجی آند پیل سوختی (خروجی آند همان ورودی

w	دبی جرمی (kg/s)
W_{com}	توان کمپرسور
Y	درصد جرمی
علائم یونانی:	
δ	دلتای کرونیگر
η_{com}	راندمان کمپرسور
μ	ویسکوزیته، (kg/m.s)
β_D	نسبت قطر ناحیه اختلاط به محفظه اختلاط
τ	تانسور تنش (N/m ²)
ω	نسبت دبی جریان ثانویه به جریان اولیه
P	چگالی، (kg/m ³)
اندیس‌ها:	
An	آند
Mem	غشا
Cr	بحرانی
P	اولیه
S	ثانویه
B	خروجی اجکتور
T	گلوگاه نازل همگرا
In	ورود
Out	خروج

۹- مراجع

- [1] M. Seddiq, M. Maerefat, M. Mirzaei, Analysis of electrochemical characteristics of a proton exchange membrane fuel cell at the cathode catalyst by Lattice-Boltzmann method, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.12, No.1, 2012, pp.115-127.(In Persian)
- [2] Wang Z.H., Wang C.Y., "Two-Phase Flow and Transport in the Interdigitated Air Cathode of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Proceedings ASME Heat Transfer Division, HTD*, Vol. 366-1, 2000, pp. 27-33.
- [3] Zhu Y., Li Y., "New Theoretical Model for Convergent Nozzle Ejector in the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System", *Journal of Power Sources*, Vol. 191, 2009, pp. 510-519.
- [4] Cheddie D., Munroe N., "Review and Comparison of Approaches to Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling", *Journal of Power Sources*, Vol. 147, 2005, pp. 72-84.
- [5] Uzunoglo M., Alam M.s., "Dynamic Modeling,

صورت گیرد که در فشار پایین تر به این مقدار ماکزیمم دبی جریان برسیم که تامین این فشار به صرفه باشد.

۴- با بررسی تأثیر افت فشار سمت آند بر عملکرد اجکتور، می توان نتیجه گرفت که افت فشار کمتر پیل، عملکرد بهتر اجکتور را به دنبال دارد. از این رو طراحی مناسب کانال های سوخت علاوه بر اینکه پخش گازها به لایه پخش گاز را بهبود می بخشد بر عملکرد اجکتور نیز تأثیر می گذارد. هر چند که طراحی کانال ها، مسالحه ای بین عملکرد پیل با افزایش بیشتر انتقال گاز به لایه پخش گاز، عملکرد اجکتور با افت فشار کمتر در پیل و توان پارازیتی کمتر پیل می باشد.

۵- فشار عملکرد پیل تأثیر به سزایی بر عملکرد اجکتور در سیستم تغذیه سوخت آند پیل سوختی غشا پلیمری دارد و با افزایش فشار عملکرد، علاوه بر عملکرد پیل، عملکرد اجکتور نیز بهبود می یابد.

۶- هر چند افزایش دمای عملکرد پیل تا یک حد مشخص عملکرد پیل را بهبود می بخشد، اما تأثیر چندانی بر عملکرد اجکتور ندارد.

۷- افزایش نسبت قطر ناحیه قطر ثابت به قطر نازل همگرا در فشار جریان اولیه بالاتر از مقدار بحرانی، باعث افزایش نسبت دبی جرمی جریان ثانویه به دبی جریان اولیه خواهد شد.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان انرژی های نو ایران (سانا) به خاطر حمایت مالی از این مطالعه تقدیر و تشکر می کنند.

۸- فهرست علائم

A	مساحت سطح (m ²)
D	قطر (m)
K	ضریب هدایت گرمایی (W/m K)
k	نسبت گرمایی ویژه
M	عدد ماخ
M_o	جرم مولکولی، (kg/mol)
P	فشار (Pa)
R	شعاع (m)
T	دما (K)
V, u	سرعت (m/s)

- [15] Zhu Y.H., Cai W.J., Wen C.Y., Li Y.Z., "Fuel Ejector Design and Simulation Model for Anodic Recirculation SOFC System", *Journal of Power Sources*, Vol. 173, 2007, pp. 437-449.
- [16] Zhu Y.H., Cai W.J., Li Y.Z., Wen C.Y., "Anode Gas Recirculation Behavior of a Fuel Ejector in Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Systems: Performance Evaluation in Three Operational Modes", *Journal of Power Source*, Vol. 185, 2008, pp. 1122-1130.
- [17] Karnik A.Y., Sun J.S., "Modeling and Control of an Ejector Based Anode Recirculation System for Fuel Cells", Third International Conference on Fuel Cell Science Engineering and Technology, Ypsilanti, MI, May, 2005
- [18] Karnik A.Y., Sun J., Buckland J.H., "Control Analysis of an Ejector Based Fuel Cell Anode Recirculation System", Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, June, 2006
- [19] Bao C., Ouyang M., Yi B., "Modeling and Control of Air Stream and Hydrogen Flow with Recirculation in a PEM Fuel Cell System - I. Control-Oriented modeling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, 2008, pp. 1879-1896.
- [20] He J., Choe S.Y., Hong C.O., "Analysis and Control of a Hybrid Fuel Delivery System for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 185, 2008, pp. 973-984.
- [21] Springer T.E., Zawodzinski T.A., Gottesfeld S., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", *Journal of Electrochemical Sources*, Vol. 138, 1991, pp. 2334-2342.
- [22] Karnik A.Y., Stefanopoulou A.G., Sun, J., "Water Equilibria and Management Using a Two-Volume Model of a Polymer Electrolyte Fuel Cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 164, 2007, pp. 590-605.
- [23] Dutta S., Shimpalee S., Van Zee J.W., "Numerical Prediction of Mass-Exchange Between Cathode Andanode Channels in a PEM Fuel Cell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, 2001, pp. 2029-2042.
- [24] Fowler, M.W., Mann, R.F., Amphlett, J.C., Peppley, B.A., Roberge, P.R., "Incorporation of Voltage Degradation Into a Generalised Steady State Electrochemical Model for PEM Fuel Cell", *Journal of power Sources*, Vol. 106, 2002. pp. 274-283.
- Design and Simulation of a PEM Fuel/Ultra Capacitor Hybrid System for Vehicular Applications", *Energy Conversion. Management*, Vol. 48, 2007, pp. 1544-1553.
- [6] Huang R.J., Chang J.M., Wang C.P., Petrenko V.A., "A 1-D Analysis of Ejector Performance", *Journal of Power Sources*, Vol. 22, 1999, pp. 354-364.
- [7] Huang R.J., Chang J.M., "Empirical Correlation for Ejector Design", *Journal of Refrigeration*, Vol. 22, 1999, pp. 379-388.
- [8] Bartosiewicz Y., Aidoun Z., Desevaux P., Mercadier Y., "Numerical and Experimental Investigations on Supersonic Ejectors", *Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, 2005, pp. 56-70.
- [9] A. Sorouradin, A. Saberi Mehr, S.M. Seyed Mahmoudi, Development of new model for prediction the performance of ejector refrigeration cycle, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol.12, No.4, 2012, pp.133-146.(In Persian)
- [10] Eames I.W., Aphornratana S., Haider H., "A Theoretical and Experimental Study of a Small-Scale Steam Jet Refrigerator", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 18, 1995, pp. 378-386.
- [11] Sun D.W., "Experimental Investigation of the Performance Characteristics of a Steam Jet Refrigeration System", *Energy Sources*, Vol. 19, 1997, pp. 349-367
- [12] Zhu Y.H., Cai W.J., Wen C.Y., Li Y.Z., "Shock Circle Model for Ejector Performance Evaluation", *Energy Conversion Management*, Vol. 48, 2007, pp. 2533-2541.
- [13] Marsano F., Magistri L., Massardo A.F., "Ejector Performance Influence on a Solid Oxide Fuel Cell Anodic Recirculation System", *Journal of Power Sources*, Vol. 129, 2004, pp. 216-228.
- [14] Ferrari M.L., Traverso A., Magistri L., Massardo A.F., "Influence of the Anodic Recirculation Transient Behavior on the SOFC Hybrid System Performance", *Journal of Power Sources*, Vol. 149, 2005, pp. 22-32.