



بررسی تجربی تأثیر پارامترهای جریان ورودی بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری

علی بزرگنژاد^۱، مهرزاد شمس^{۲*}، همایون کنعانی^۳، محمدرضا هاشمی نسب^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، shams@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ آبان ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۴ دی ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۴ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:

پیل سوختی غشا پلیمری

آب

تصویربرداری اپتیکال

نسبت طول آب پوشانی

حالت ناپایا

وجود آب در پیل سوختی غشا پلیمری به دلیل تأمین رطوبت مورد نیاز غشا جهت تأمین رسانایی یونی ضروری می باشد؛ ولی انباشت بیش از اندازه آب مایع در پیل که به عنوان پدیده طغیان شناخته می شود، به دلیل کاهش تعداد مسیرهای گازهای واکنش دهنده در لایه نفوذ گاز و مکان های واکنش لایه کاتالیست و افزایش افت انتقال جرم، باعث افت عملکرد پیل می گردد. در این پژوهش با استفاده از تصویربرداری اپتیکال، جریان دو فاز درون کانال جریان کاند یک پیل سوختی غشا پلیمری شفاف با کانال تک مارپیچ به صورت ناپایا و میانگین زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت طول آب پوشانی و میانگین زمانی آن، که به ترتیب معیاری از آب مایع موجود در هر لحظه و میانگین زمانی آن در کانال جریان کاند می باشد، محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که با افزایش استوکیومتری، کاهش رطوبت نسبی و افزایش دمای گازهای ورودی در دو سمت کاند و آند، میزان آب مایع انباشته شده در کانال جریان کاند در حالت های ناپایا و میانگین زمانی کاهش می یابد. در حالات ناپایا و میانگین زمانی، تأثیر استوکیومتری آند بر میزان آب مایع انباشته شده در کانال کاند، بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاند می باشد.

Experimental study of the effect of inlet flow parameters on the operation of PEMFC

Ali Bozorgnezhad¹, Mehrzad Shams^{2*}, Homayoon Kanani³, Mohammad Reza Hashemi Nasab⁴

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

4- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, shams@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 November 2013
Accepted 25 December 2013
Available Online 14 June 2014

Keywords:

Pemfc
Water
Optical Visualization
Water Coverage Length Ratio
Unsteady State

ABSTRACT

Water is needed to providing proper hydration of membrane and its ionic conductivity in polymer electrolyte membrane fuel cells, but excess water accumulation known as flooding phenomenon decreases the passing way of reactants in the GDL and reaction sites on catalyst layer and increases mass transport loss and leads to performance loss of polymer electrolyte membrane fuel cells. In the present work, the two-phase flow in the cathode channel of transparent polymer electrolyte membrane fuel cell with single serpentine flow field is visualized by direct optical imaging in unsteady and time averaged states. Then the water coverage length ratio and the average of water coverage length ratio are derived as a scale of water content of the cathode channel in the unsteady and time averaged states. In the unsteady and time averaged states, by increase the stoichiometry, decrease the relative humidity and inlet gases temperature in anode and cathode sides, the accumulated liquid water in the channels reduces. The effect of anode stoichiometry on the amount of water in the cathode channel in the unsteady and time averaged states is more than the cathode stoichiometry.

۱- مقدمه

دلیل چگالی جریان بالا و شروع به کار سریع به عنوان محبوب ترین فناوری پیل های سوختی در کاربردهای حمل و نقل مطرح می باشند. مدیریت آب به- عنوان یک موضوع بسیار ضروری در پیشرفت پیل های سوختی غشا پلیمری مطرح می باشد. آب مایع در پیل سوختی از دو طریق انجام واکنش الکتروشیمیایی تولید آب و تقطیر رطوبت موجود در گازهای ورودی به وجود

امروزه پیل های سوختی، به دلیل خصوصیات ویژه ی خود، از سوی تولیدکنندگان خودرو بیش از پیش به عنوان یک جایگزین بالقوه موتورهای احتراق داخلی، مورد توجه قرار گرفته اند. پیل های سوختی غشا پلیمری^۱ به

1- PEMFC

Please cite this article using:

A. Bozorgnezhad, M. Shams, H. Kanani, M.R. Hashemi Nasab, Experimental study of the effect of inlet flow parameters on the operation of PEMFC, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 33-43, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌آید. با اینکه وجود آب در پیل‌های سوختی غشا پلیمری جهت تأمین رطوبت مورد نیاز غشا ضروری می‌باشد، انباشت بیش از اندازه آب مایع درون پیل سوختی باعث کاهش قابل ملاحظه انتقال جرم، عملکرد و دوام پیل سوختی می‌گردد که این پدیده طغیان^۱ نام دارد [۱].

عامل تولید آب مایع و جریان دو فاز در پیل‌های سوختی غشا پلیمری، یک فرآیند الکتروشیمیایی می‌باشد. در ابتدا هیدروژن و اکسیژن (هوا) از طریق کانال‌های جریان به ترتیب وارد قسمت‌های آند و کاتد پیل سوختی می‌گردد. سپس گازها از طریق محیط متخلخل لایه نفوذ گاز وارد مکان‌های واکنش در لایه کاتالیست می‌گردد. در الکتروآند، هیدروژن جهت تولید یون H^+ و انتقال از طریق غشا، اکسایش می‌یابد. یون H^+ از طریق غشا به سمت کاتد منتقل می‌شود و جریان الکترون‌ها، جهت تولید الکتریسته، از طریق یک مدار خارجی به سمت الکتروآند کاتد منتقل می‌گردد. الکترون‌ها در سطح لایه کاتالیست سمت کاتد با یون H^+ و اکسیژن ترکیب می‌شوند و آب تولید می‌گردد.

واکنش‌هایی که در پیل سوختی غشا پلیمری رخ می‌دهد عبارت است از:



در حالت طغیان مربوط به کانال‌های جریان، آب مایع انباشته شد هدر کانال‌های جریان به شکل جریان قطرات بزرگ^۲، حلقوی^۳، توده‌ای^۴ و یا مانع^۵ تجمع می‌یابد. در این صورت، این آب مایع می‌تواند باعث انسداد کانال‌های جریان یا مانع از عبور واکنش دهنده‌ها و نفوذ آن‌ها در لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست گردد. این امر باعث کاهش مساحت سطح فعال الکتروشیمیایی پیل سوختی غشا پلیمری و در نتیجه محدود شدن واکنش‌های شیمیایی و در نهایت کاهش قابل ملاحظه کارایی و توان پیل سوختی غشا پلیمری می‌گردد. پدیده طغیان معمولاً در دماها و نرخ‌های جریان پایین رخ می‌دهد که گازها توان خروج آب مایع را نداشته باشند [۲].

اخیراً موضوع مدیریت آب در مقالات به‌عنوان یک موضوع کلیدی تحقیقاتی در پیشرفت و تکامل پیل‌های سوختی غشا پلیمری در زمینه کاربردهای خودرویی، حمل و نقل و قابل حمل ظاهر شده است. وجود آب در پیل سوختی غشا پلیمری جهت مرطوب بودن و رسانایی یونی غشا ضروری می‌باشد؛ ولی انباشت آب مایع در پیل، منجر به پدیده طغیان در پیل می‌گردد که این پدیده کاهش کارایی و دوام پیل را در پی دارد [۱-۵]. انواع اصلی طغیان در پیل سوختی غشا پلیمری که شناسایی شده است عبارت است از:

- ۱- طغیان در لایه‌های کاتالیست و نفوذ گاز ۲- طغیان در کانال‌های جریان. جمع شدن آب مایع داخل لایه‌های کاتالیست و نفوذ گاز باعث مسدود شدن منافذ و کاهش سطح فعال واکنش می‌گردد. در طغیان کانال‌های جریان، جریان دو فاز درون کانال‌ها می‌تواند مانع جریان واکنش دهنده‌ها و پخش مناسب آن‌ها درون لایه نفوذ گاز و محدود کردن کارایی پیل به دلیل افت‌های انتقال جرم و کاهش سطح فعال الکتروشیمیایی گردد [۴].

دستیابی به میزان آب مایع انباشته شده در کانال‌های جریان و رژیم جریان آب مایع، جهت بررسی دقیق افت توان ناشی از تجمع آب مایع در کانال‌های جریان، پیشرفت مدیریت آب و روش‌های تخلیه آب مایع

انباشته‌شده ضروری می‌باشد.

بررسی اپتیکال^۶ پیل سوختی با بدنه شفاف، یک روش متداول بررسی و مشاهده کانال‌های جریان پیل سوختی غشا پلیمری می‌باشد، درحالی که تعداد بسیار محدودی بررسی اپتیکی، توانایی به‌دست آوردن اطلاعات کمی مربوط به میزان تجمع آب مایع و جریان دو فاز موجود در کانال‌های جریان را داشته‌اند [۲].

در این پژوهش، بررسی اپتیکال یک پیل سوختی غشا پلیمری شفاف با استفاده از یک دوربین سرعت بالا^۷ جهت بررسی جریان دو فاز کانال جریان کاتد و به‌دست آوردن اطلاعات کمی مورد نیاز، انجام شده است. آب مایع موجود در کانال با تکنیک‌های پردازش تصاویر دیجیتال^۸ شناسایی شده‌اند که با استفاده از این روش‌ها دقت شناسایی آب مایع موجود در کانال افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر میزان محتوای آب کانال کاتد در طول زمان و همچنین در حالت میانگین زمانی محاسبه شده است. برای این منظور، پارامتر "نسبت طول آب پوشانی" معرفی می‌شود که عبارت است از نسبت طولی از قسمت‌های کانال که دارای جریان دوفاز می‌باشد به طول کل کانال کاتد. این پارامتر بیانگر میزان آب تجمع یافته در کانال کاتد در طول زمان می‌باشد و سپس با محاسبه میانگین مقادیر نسبت طول آب پوشانی در طول زمان، میانگین نسبت طول آب پوشانی محاسبه می‌شود. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش در زمینه‌های زیر سودمند خواهد بود:

۱- بررسی دقیق‌تر آب مایع در کانال‌های پیل سوختی غشا پلیمری

۲- پیش‌بینی بهتر رفتار جریان دو فاز در کانال‌های جریان در حالت نا پایا

۳- تأثیر پارامترهای ورودی بر روی جریان دو فاز

۴- اعتبارسنجی مدل‌های عددی پیل سوختی غشا پلیمری

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

توبرو همکارانش [۶] اولین گروهی بودند که روش بررسی اپتیکی مستقیم را جهت مشاهده انباشت آب مایع در کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری شفاف در دماهای پایین به کار بردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در حالت دما پایین و شرایط شروع به کار با دمای اولیه کم، لایه‌های نفوذ گاز آب دوست برای پیل سوختی نسبت به لایه‌های نفوذ گاز آب‌گریز مفیدتر می‌باشند.

سوگیورا و همکارانش [۷] با استفاده از لایه جذب آب و یک سری کانال مجزا کنار کانال‌های گاز، انباشت آب مایع در کانال‌های موازی و تک مارپیچ را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در کانال‌های موازی اگر یک کانال با آب مایع مسدود شود، این انسداد به سختی برطرف می‌شود. با اضافه کردن لایه جذب آب^۹، میزان طغیان ۴ تا ۵ برابر کاهش یافت.

ژانگ و همکارانش [۸] با بررسی یک پیل غشا پلیمری شفاف به این نتیجه رسیدند که در صورتی که ابعاد کانال کوچک‌تر از قطر جدایش قطره باشد، این امر منجر به تماس قطره با دیواره‌ی کانال قبل از اینکه از سطح لایه نفوذ گاز جدا شود می‌گردد و همین موضوع باعث افزایش انباشتگی آب مایع در کانال‌های جریان می‌گردد.

آی سو و همکارانش [۹] چهار نوع کانال جریان متفاوت تک مارپیچ، موازی، انتها بسته و مارپیچ-انتها بسته را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پدیده طغیان در بالادست جریان کانال‌های مارپیچ-انتها بسته رخ نمی‌دهد. پدیده طغیان معمولاً در گوشه‌ها رخ می‌دهد. کانال‌های

6- Optical Visualization
7- High speed camera
8- Digital Image Processing (DIP)
9- WAL (Water Absorption Layer)

1- Flooding
2- Large droplet
3- Annular
4- Slug
5- Plug

مارپیچ-انتها بسته از لحاظ خروج آب مایع در مساحت‌های کوچک بهتر می‌باشند؛ ولی در مساحت‌های بزرگ، کانال‌های مارپیچ کارایی بهتری دارد. جی و وانگ [۱۰] اولین افرادی بودند که یک پیل سوختی غشا پلیمری شفاف را جهت بررسی تولید آب مایع و پدیده طغیان در سمت آند مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از یک لایه نفوذ گاز آب دوست می‌توان پدیده طغیان را کمتر کرد.

لیو و همکارانش [۱۱] رابطه بین طغیان آب مایع و افت فشار را در یک پیل سوختی غشا پلیمری به وسیله بررسی دما، چگالی جریان و زمان عملکرد روی افت فشار کل سمت کاتد و آند، بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود آب مایع به دلیل محدودیت در انتقال جرم باعث کاهش عملکرد پیل می‌شود. در حالت کلی، افت فشار جریان کاتد نسبت به آند بیشتر است. در سال ۲۰۰۸، همین گروه اثرات دمای پیل سوختی و نرخ جریان کاتد و زمان عملکرد روی جریان دو فاز جریان و مایع در پیل سوختی را بررسی کردند [۱۲]. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش دمای پیل باعث کاهش تقطیر و افزایش سرعت واکنش الکتروشیمیایی می‌گردد که همین امر موجب عملکرد بهتر پیل سوختی می‌گردد. در صورتی که افزایش بسیار زیاد دما می‌تواند اثر منفی روی غشا و خشک شدن آن و کاهش عملکرد پیل داشته باشد.

اوس و آرکومانیس [۱۳] یک پیل سوختی شفاف با کانال مارپیچ را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ضریب استوکیومتری سمت کاتد و آند نقش مشابه در میزان آب مایع انباشته شده دارد؛ ولی ضریب استوکیومتری سمت آند، برعکس سمت کاتد، نقش کمی در خروج آب مایع دارد.

اسپرینجک و همکارانش [۱۴] یک روش جدید برای بررسی پدیده طغیان در پیل سوختی ابداع کردند که نتیجه ترکیب دو روش پرتو نگاری نوترونی و تصویربرداری مستقیم بود.

حسینی و وانگ [۱۵] پدیده طغیان را در سمت کاتد یک پیل سوختی پلیمری شفاف مورد بررسی اپتیکی قرار دادند. آن‌ها در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که پدیده طغیان بیشتر در محل‌های خروج آب مایع رخ می‌دهد.

سرجی و همکارانش [۱۶] کانال‌های جریان سمت کاتد و آند یک پیل سوختی پلیمری شفاف با کانال موازی را مورد بررسی اپتیکی هم زمان قرار دادند. در اکثر شرایط کارکرد، آب مایع انباشته شده در سمت آند از کاتد بیشتر می‌باشد.

روزلی و همکارانش [۱۷] با بررسی یک پیل سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ شفاف به این نتیجه رسیدند که کانال تک مارپیچ، آب مایع انباشته شده را به راحتی خارج می‌کند و رطوبت زنی سمت کاتد مشخصاً بسیار مهم تر از سمت آند می‌باشد، زیرا در حالت آند خشک، هیچ آب مایعی در سمت آند قابل رویت نمی‌باشد و غشا خشک شده و توان پیل به دلیل افزایش مقاومت یونی، کاهش می‌یابد.

ژان و همکارانش [۱۸] با بررسی یک پیل سوختی پلیمری تک مارپیچ شفاف به این نتیجه رسیدند که آب مایع انباشته شده در زیر فاصله بین کانال‌ها (تیغه‌ها)، بسیار بیشتر از آب مایع انباشته شده در کانال‌ها می‌باشد.

افشاری و جزایری [۱۹]، با ارائه الگوی عددی دوبعدی و دو فاز، یک پیل سوختی غشا پلیمری برای کاربرد در خودرو را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش چگالی جریان، عملکرد پیل به دلیل طغیان در لایه‌ی نفوذ گاز کاتد، توأم با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد و در چگالی جریان‌های بالا، پیل ضعیف‌ترین عملکرد را در نرخ جریان پایین دارا می‌باشد که این امر ناشی از محدودیت انتقال جرم و طغیان کاتد می‌باشد.

روشندل و همکاران [۲۰]، با شبیه‌سازی عددی مدیریت آب در پیل سوختی غشا پلیمری به این نتیجه رسیدند که رسانایی یونی غشا و تخلخل مؤثر لایه نفوذ گاز بیش‌ترین تأثیر را از میزان رطوبت پیل سوختی می‌پذیرند. رشیدی بنام و همکاران [۲۱]، عملکرد لایه کاتالیست یک پیل سوختی پلیمری تحت شرایط طغیان را توسط مدل‌سازی ریاضی بررسی کردند. نتایج نشان داد که چگالی جریان در عمق لایه کاتالیست از غشا به سمت لایه نفوذ گاز، به دلیل پدیده‌ی طغیان کاهش می‌یابد.

۳- انواع روش‌های بررسی مدیریت آب

جهت بررسی بهتر طغیان در کانال‌ها و اثر آن بر روی عملکرد پیل سوختی، انواع مختلفی از روش‌های بررسی، شناسایی و تشخیص آب مایع در پیل سوختی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: ۱- مقاومت فرکانس بالا [۲۲]، ۲- افت فشار [۱۵] و ۳- بررسی تصویری.

در بین این تکنیک‌ها، بررسی تصویری دارای مزیت بررسی هم‌زمان مکانی و زمانی پخش آب مایع در کانال‌های جریان کاتد، آند و لایه نفوذ گاز و همچنین بررسی دینامیک انتقال آب و ساختار جریان دو فاز می‌باشد. پنج روش از مشهورترین روش‌های آزمایشگاهی بررسی تصویری عبارت‌اند از: اشعه ایکس [۲۳]، رزونانس مغناطیسی [۲۴-۲۷]، پرتونگاری نوترونی [۴، ۵، ۲۸، ۲۹]، کروماتوگرافی گاز [۳۰، ۳۱] و بررسی اپتیکی مستقیم [۱۶، ۱۷].

در روش اشعه ایکس، یک پرتو اشعه ایکس به پیل تابانده می‌شود و با توجه به انحراف این پرتو در نتیجه برخورد با آب، میزان آب تولیدی به صورت یک نقشه سه‌بعدی به دست می‌آید. این روش هم دارای تفکیک‌پذیری مکانی مناسب و هم تفکیک‌پذیری زمانی مناسب می‌باشد؛ اما ضعف این روش در آن است که نمی‌تواند همزمان تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی مطلوب را جهت بررسی آب تولیدی در پیل سوختی فراهم کند [۳۲].

در روش رزونانس مغناطیسی، یک هسته اتم توسط میدان مغناطیسی با فرکانس خاصی برانگیخته می‌شود و پس از عبور از پیل سوختی با بررسی فرکانس جدید این هسته، میزان آب موجود در پیل سوختی محاسبه می‌شود. این روش دقت بسیار دارد؛ ولی دارای تفکیک‌پذیری بسیار پایینی می‌باشد و همچنین با مواد کربنی ناسازگار می‌باشد [۳۲].

پرتونگاری نوترونی یک تکنیک غیر نفوذی مورد استفاده برای بررسی تصویری و کمی وجود آب مایع در کانال‌های جریان، لایه نفوذ گاز، غشا سرهم شده با الکتروود و ناحیه زیرسطحی می‌باشد [۳۲]. در روش پرتونگاری نوترونی، اشعه تولید شده از یک منبع نوترونی خارج می‌شود و از یک پیل سوختی در حال کارکرد عبور می‌کند و افت قدرت اشعه، ضخامت آب را نشان می‌دهد (به صورت دوبعدی). خاصیت دوبعدی پرتونگاری نوترونی تشخیص آب موجود در کاتد و آب موجود در آند را از یکدیگر سخت می‌کند، زیرا تشخیص اینکه آب در کدام لایه (کانال‌های آند، کانال‌های کاتد یا غشا سرهم شده با الکتروود) قرار دارد، سخت می‌باشد. همچنین کاربرد این روش به دلیل تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی (به ترتیب حدوداً ۲۵ میکرومتر و ۵/۴ ثانیه [۳۲]) محدود می‌باشد که همین امر، این روش را در بررسی دینامیک انتقال آب ناتوان می‌سازد. پرتونگاری نوترونی محدودیت‌های زیادی در بررسی تصویری قطرات آب کوچک که با سرعت در حال حرکت می‌باشند، دارد و به

1- High Frequency Resistance (HFR)

2- X-Ray

3- MRI (Magnetic Resonance Imaging) or NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

4- Neutron Radiography

5- Gas Chromatography

6- Nuclei

در حال عملکرد آمده است. گاز ورودی سمت کاند اکسیژن و سمت آند هیدروژن می‌باشد.

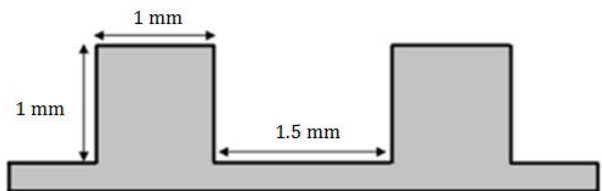
سل شامل کانال‌های جریان کاتد و آند می‌باشد که در بین این دو بخش، سل ۷ لایه (لایه‌های نفوذ گاز^۲، لایه‌های کاتالیست^۵، لایه‌های نازک تخلخلی^۶ تخلخلی^۷ و غشا^۸) به صورت فشرده قرار دارند. جریان توسط یک توری نیکلی نیکلی به ضخامت ۵۰ میکرومتر از روی سطح لایه کاتالیست جمع‌آوری شده و سپس به یک بلوک مسی آب طلاکاری شده منتقل و در نهایت توسط سیم‌های مسی از بلوک به سمت مدار خارجی منتقل می‌شود.

کانال به صورت تک مارپیچ و شامل ۲۱ ردیف افقی و ۲۰ زانویی می‌باشد. غشا پلیمری از جنس نفیون ۱۱۷^۹ می‌باشد. غشا سرهم شده با الکتروود^۹، شامل لایه‌های نفوذ گاز کاتد و آند و غشا پلیمری پوشیده شده با کاتالیست می‌باشد. ضخامت لایه نفوذ گاز ۲۶۰ میکرومتر می‌باشد. چگالی پلاتین در سمت آند 0.4 mg/cm^2 و در سمت کاتد 0.6 mg/cm^2 می‌باشد. جهت آب-بندی و جلوگیری از نشتی گازهای واکنش دهنده در هر سمت کاتد و آند از یک حلقه پلاستیکی^{۱۰} استفاده شده است. تعداد هشت عدد پیچ آلن به قطر ۶ میلی‌متر جهت بستن پیل استفاده شده است. گشتاور موجود روی هر پیچ ۱ (نیوتون متر) می‌باشد. خصوصیات کلی پیل با توجه به دفترچه راهنمای شرکت سازنده‌ی غشا سرهم شده با الکتروود آمده است.

سیستم تصویربرداری شامل یک دوربین سرعت بالای کاسیو می‌باشد. این دوربین دارای تفکیک‌پذیری 1080×1920 مگا پیکسل^{۱۱} و نرخ فریم ۶۰ تا ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۱- الف کانال جریان سمت کاتد و محل ورودی و خروجی جریان اکسیژن



شکل ۱- ب ابعاد کانال‌های جریان

- 4- Gas Diffusion Layer (GDL)
- 5- Catalyst Layer (CL)
- 6- Micro Prous Layer (MPL)
- 7- CCM(Catalyst Coated Membrane)
- 8- Nafion
- 9- MEA(Membrane Electrode Assembly)
- 10- O-ring
- 11- Full HD

علاوه خطاهای کالیبراسیون منجر به بررسی با دقت کمتر در پیل‌های در حال کارکرد می‌گردد[۱۴]. همچنین استفاده از این روش به دلیل هزینه بالا و وسایل آزمایشگاهی کمیاب سخت می‌باشد[۳۳].

کروماتوگرافی گاز دارای اطلاعات مفیدی در زمینه پخش گونه‌ها در کاتد و آند و همچنین انتقال آب در غشا می‌باشد؛ ولی این روش در حالتی کاربرد دارد که آب تولیدی زیاد باشد[۳۰-۳۱].

بررسی اپتیکی به عنوان یک روش جایگزین برای دیگر روش‌ها می‌باشد که هم هزینه کمتری دارد و هم تفکیک‌پذیری همزمان مکانی و زمانی بالایی دارد و به همین دلیل، ما را قادر به تصویربرداری بسیار دقیق از دینامیک جریان دو فاز موجود در کانال‌های جریان می‌سازد. این اطلاعات و توانایی‌ها می‌تواند باعث بهبود و تقویت طراحی پیل سوختی شود و همچنین در انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت پیل سوختی، مورد استفاده قرار گیرد. این روش امکان بررسی مستقیم عملکرد پیل سوختی، با توجه به میزان انباشتگی و خروج آب برای دستیابی به حالت بهینه مدیریت آب و کارکرد پیل را میسر می‌سازد. در نتیجه، بررسی اپتیکی مستقیم یک گزینه ایده‌آل برای بررسی جریان دو فاز درون کانال‌های گاز و سطح لایه نفوذ گاز می‌باشد.

به دلیل مزیت‌های بیان شده و همچنین هزینه پایین‌تر روش تصویربرداری اپتیکال مستقیم نسبت به دیگر روش‌ها، در این پژوهش از این روش برای بررسی مدیریت آب در پیل‌های سوختی غشا پلیمری استفاده می‌شود.

۴- خصوصیات پیل سوختی و دستگاه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، یک پیل سوختی شفاف با امکان دستیابی اپتیکی به کانال جریان سمت کاتد، جهت بررسی تصاویر کانال این سمت، تهیه شده است. سطح فعال پیل سوختی $5 \times 5 \text{ cm}^2$ می‌باشد که در کاربردهای قابل حمل مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین یک سیستم دوربین سرعت بالای کاسیو مدل ای ایکس-اف ۱، جهت تصویربرداری و مشاهده‌ی جریان دو فاز در سمت کاتد کانال پیل سوختی در هنگام عملکرد تعبیه شده است. این مجموعه آزمایشگاهی اطلاعات مربوط به شناسایی و مقدار سنجی کمتی آب مایع و پخش جریان دو فاز آب مایع را در دسترس ما قرار می‌دهد. این پژوهش جهت بررسی تأثیر نسبت استوکیومتری، رطوبت نسبی و دمای گازهای ورودی کاتد و آند بر مدیریت آب پیل سوختی غشا پلیمری انجام شده است. آزمایش‌ها توسط یک دستگاه تست پتانسیوستات و گالوانوستات و یک واحد مدیریت جریان گاز^۱ انجام می‌شود. در آزمایش‌ها پیل به صورت ایستاده و کانال‌های جریان به صورت افقی می‌باشند. جریان در سمت کاتد و آند به صورت غیرهمسو می‌باشد که خروجی جریان در سمت کاتد در بالا قرار دارد. ضوابط اتمام آزمایش، پایداری آن و یا جلوگیری از کارکرد پیل در محدوده آسیب‌پذیری آن می‌باشد. تمامی آزمایش‌ها براساس استاندارد جی آر سی^۲ اروپا تدوین شده است.

کانال جریان بر روی صفحات انتهایی و از جنس شفاف (پلکسی گلاس)^۳ می‌باشد که امکان دستیابی اپتیکی به کانال جریان را فراهم می‌کند. عرض و ارتفاع کانال به ترتیب $1/5$ و ۱ میلی‌متر می‌باشد و طول هر ردیف کانال ۴۸ میلی‌متر می‌باشد که در فاصله ۱ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند. ابعاد کانال‌های کاتد و آند برابر یکدیگر است. در شکل ۱- الف، تصویر کانال جریان کاتد و در شکل ۱- ب ابعاد کانال آورده شده است. در شکل ۲- الف تصویر شماتیک مجموعه آزمایشگاهی آورده شده است. در شکل ۲- ب، تصویر پیل

- 1- Gas handling unit
- 2- JRC
- 3- Plexi Glass

به دلیل شفافیت و انعکاس نور صفحات پلکسی و همچنین شفافیت آب تولیدی، تفکیک آب تولیدی از سطح لایه نفوذ گاز، صفحات پلکسی امری دشوار می‌باشد. در صورت عدم تابش یکنواخت نور سفید روی سطح پلکسی، در نمودار تمرکز پیکسل تصاویر، دارای پرش و نقاط نوک تیز می‌باشد که تفکیک پذیری تصاویر را دشوار می‌سازد. از این رو جهت تابش نور، فاصله منبع نور تا سطح پلکسی و زاویه تابش نور اهمیت فراوانی دارد. شکست و انکسار نور عبوری از دیوار کانال بر روی تصویربرداری تأثیر نسبتاً زیادی دارد. جهت کاهش اثر شکست و همچنین بازتاب نور از سطح پلکسی گلاس، چندین حالت قرار گیری دوربین و سیستم نورپردازی آزمایش شد و سپس حالت بهینه سیستم نورپردازی و تصویربرداری که بازتاب نور حداقل باشد مشخص گردید.

۵- بحث و نتایج

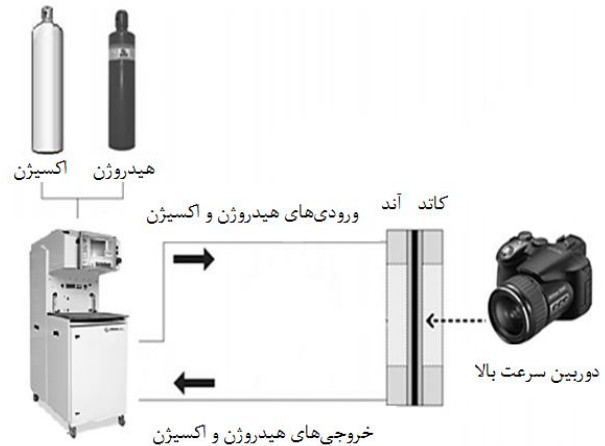
تمامی آزمایش‌ها در چگالی جریان 0.3 (آمپر بر سانتی‌مترمربع) صورت پذیرفته است. به دلیل استفاده از توری جمع‌کننده جریان بسیار نازک نیکی که موجب مقاومت الکتریکی زیادتری نسبت به استفاده از صفحات فلزی جمع‌کننده جریان می‌شود و با توجه به محدوده پایین دمای کارکرد پیل به دلیل استفاده از صفحات پلکسی گلاس و همچنین نوع پیل مورد استفاده، در نمودار قطبش پیل (شکل ۳) بیشینه توان در نزدیکی چگالی جریان 0.3 (آمپر بر سانتی‌مترمربع) رخ می‌دهد که به همین دلیل از این چگالی جریان برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. با توجه به ثابت بودن چگالی جریان در رابطه (۲)، نرخ آب تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی سمت کاتد در تمام آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، بنابراین در این آزمایش‌ها می‌توان نقش پارامترهای جریان ورودی پیل سوختی غشا پلیمری را بر انباشته شدن آب در کانال جریان کاتد با یکدیگر مقایسه نمود. میزان آب تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی (برحسب $\text{gH}_2\text{O/s}$) با استفاده از قانون فارادی دوم فارادی در رابطه (۲) آمده است [۳۴].

$$\dot{m}_{\text{gen}} = \frac{iA}{2F} MW_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، i چگالی جریان، A سطح فعال، F ثابت فارادی و $MW_{\text{H}_2\text{O}}$ وزن مولکولی آب می‌باشد.

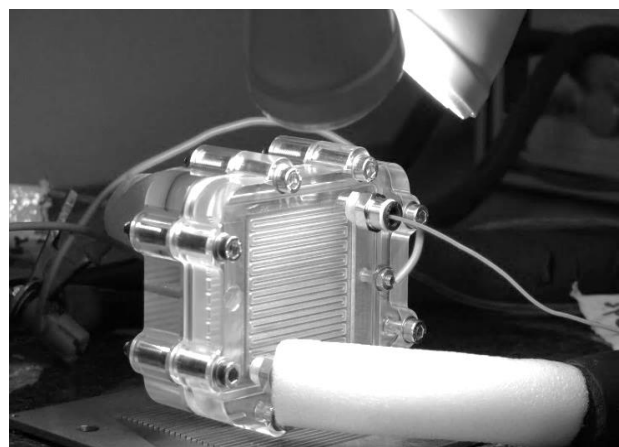
در این پژوهش پارامتر "نسبت طول آب پوشانی" معرفی می‌شود که عبارت است از نسبت طولی از قسمت‌های کانال که دارای جریان دو فاز می‌باشد به طول کل کانال کاتد. این پارامتر بیانگر میزان آب تجمع یافته در کانال کاتد در طول زمان (حالت ناپایا) می‌باشد. سپس با میانگین‌گیری از نسبت طول آب پوشانی در طول زمان، میانگین نسبت طول آب پوشانی محاسبه می‌شود.

آب مایع موجود در کانال با استفاده از پردازش تصاویر دیجیتال شناسایی می‌شود. در ابتدا با استفاده از تکنیک‌های تفریق و آستانه سازی، تصاویر کانال بدون جریان دو فاز و تصاویر آزمایش پردازش می‌شوند. برای بهبود کیفیت تصویر پردازش شده اولیه و شناسایی قطرات آب، از پردازش ساختارشناسی^۳ استفاده می‌شود. به صورت کلی ۳ ناحیه در تصویرهای پردازش شده موجود می‌باشد: ۱- ناحیه‌ای که هیچ آب مایعی در آن قابل مشاهده نمی‌باشد؛ ۲- ناحیه‌ای که بیانگر آب مایع موجود در کانال‌های پیل سوختی می‌باشد؛ ۳- ناحیه‌ای که مربوط به قطرات بسیار ریز ناشی از رطوبت تقطیر شده می‌باشد. این نواحی در شکل ۴-الف نشان داده شده‌اند. در شکل ۴-الف، محدوده‌های نواحی بدون آب مایع با مستطیل خط‌چین شده، نواحی پوشیده از قطرات بسیار ریز

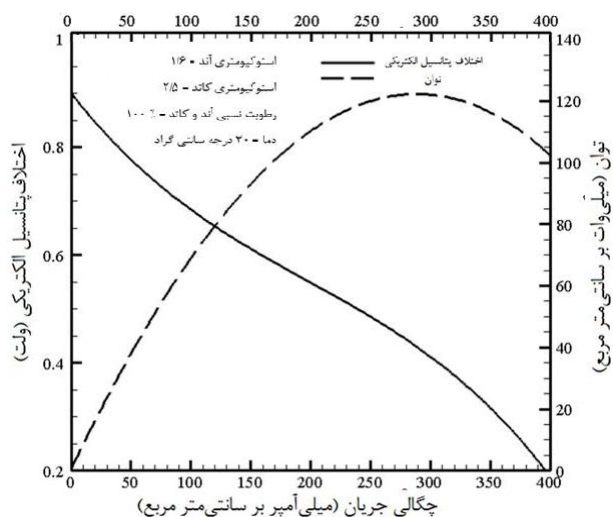


دستگاه تست پیل

شکل ۲-الف تصویر شماتیک مجموعه آزمایشگاهی



شکل ۲-ب تصویر پیل در حال عملکرد



شکل ۳ نمودار قطبش و توان پیل سوختی

این دوربین قابلیت تصویربرداری مداوم و با سرعت و کیفیت بالا را دارا می‌باشد که در این پژوهش از حداکثر کیفیت عکس‌برداری در تصاویر خام^۱ و حداکثر کیفیت فیلم‌برداری در حالت فیلم‌برداری با پسوند موو^۲ استفاده شده است.

سیستم نور پردازی یکی از اساسی‌ترین قسمت‌های این آزمایش می‌باشد.

1- RAW
2- Mov

۱-۵- آزمایش‌های استوکیومتری

۱-۱-۵- آزمایش‌های استوکیومتری کاند ثابت

در این آزمایش‌ها مقدار استوکیومتری کاند در هر سه آزمایش متوالی، یکی از مقدارهای ثابت ۱/۶، ۲/۵ یا ۳/۴ می‌باشد و استوکیومتری آند تغییر می‌کند. با بررسی شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج مشاهده می‌شود که در تمامی زمان‌ها (در حالت ناپایا)، با ثابت نگهداشتن استوکیومتری کاند و افزایش استوکیومتری آند، نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. این امر این‌گونه توجیه می‌شود که با افزایش استوکیومتری آند، نرخ جریان گاز سمت آند افزایش می‌یابد و میزان آب بیشتری از کانال سمت آند از طریق جریان گاز خارج می‌شود. در نتیجه غلظت آب در سمت آند کاهش می‌یابد و مقداری از آب کاند با مکانیزم نفوذ معکوس^۱ از سمت کاند به سمت آند انتقال می‌یابد و در نهایت آب انباشته شده در کانال کاند کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج مشاهده می‌شود که با افزایش استوکیومتری کاند که در هر کدام از این شکل‌ها ثابت می‌باشد، با افزایش استوکیومتری آند، اختلاف مقادیر نسبت طول آب‌پوشانی نسبت به یکدیگر کمتر می‌شود و به یکدیگر نزدیک می‌شوند و به عبارت دیگر با افزایش استوکیومتری کاند، تأثیر افزایش استوکیومتری آند بر روی نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود. در شکل ۶، با ثابت نگهداشتن استوکیومتری کاند و افزایش استوکیومتری آند، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری کاند، تأثیر افزایش استوکیومتری آند بر میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود.

۱-۲-۵- آزمایش‌های استوکیومتری آند ثابت

در این آزمایش‌ها مقدار استوکیومتری آند در هر سه آزمایش متوالی، یکی از مقدارهای ثابت ۱/۶، ۲/۵ یا ۳/۴ می‌باشد و استوکیومتری کاند تغییر می‌کند. با بررسی شکل‌های ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج مشاهده می‌گردد که در تمامی زمان‌ها (در حالت ناپایا)، با ثابت نگهداشتن استوکیومتری آند و افزایش استوکیومتری کاند، نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. این امر با توجه به افزایش نرخ جریان گاز کاند در نتیجه افزایش استوکیومتری کاند قابل توجیه می‌باشد، زیرا با توجه به افزایش نرخ جریان گاز سمت کاند، میزان آب بیشتری از طریق جریان گاز خارج می‌شود و آب کمتری در کانال کاند انباشته می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج مشاهده می‌شود که با افزایش استوکیومتری آند که در هر کدام از این شکل‌ها ثابت می‌باشد، اختلاف مقادیر نسبت طول آب‌پوشانی نسبت به یکدیگر کمتر می‌شود و به عبارت دیگر با افزایش استوکیومتری آند، تأثیر افزایش استوکیومتری کاند بر روی نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود به طوری که در شکل ۷-ج، مشاهده می‌شود با اینکه نسبت استوکیومتری سمت کاند افزایش می‌یابد، هر سه سری مقادیر نسبت طول آب‌پوشانی، اختلاف بسیار کمی دارند.

در شکل ۸، با ثابت نگهداشتن استوکیومتری آند و افزایش استوکیومتری کاند، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری آند، تأثیر افزایش استوکیومتری کاند بر روی میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود.

۱-۳-۵- مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های استوکیومتری کاند ثابت و آند ثابت

با مقایسه هر جفت از شکل‌های ۵ و ۷ (۵-الف با ۷-الف، ۵-ب با ۷-ب و ۵-ج با ۷-ج) مشخص می‌گردد که تغییرات استوکیومتری آند تأثیر بیشتری بر میزان نسبت طول آب‌پوشانی و در نتیجه میزان آب انباشته شده در کانال جریان کاند، نسبت به تغییر استوکیومتری کاند دارد و در نتیجه در حالت ناپایا، تأثیر استوکیومتری آند بر مدیریت آب کانال کاند پیل سوختی غشا

(جریان مه‌گون) با مستطیل و نواحی آب مایع با رنگ سفید و بدون مستطیل محصورکننده مشخص شده‌اند. در شکل ۴-ب، یک تصویر از کانال کاند و در شکل ۴-ج آب مایع موجود در آن با رنگ سفید، نمایش داده شده است.

در آزمایش‌های بررسی تأثیر استوکیومتری بر عملکرد پیل، با در نظر گرفتن سه مقدار استوکیومتری ۱/۶، ۲/۵ و ۳/۴، تعداد نه آزمایش متفاوت طراحی شده است که در هر کدام از این آزمایش‌ها، جریان‌های سمت کاند و آند یکی از این سه مقدار را دارند. این آزمایش‌ها در شرایط دمای گازهای ورودی ۳۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱ اتمسفر و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ برای گازهای ورودی سمت کاند و آند انجام شده است.

در آزمایش‌های بررسی تأثیر رطوبت نسبی بر عملکرد پیل، با در نظر گرفتن سه مقدار رطوبت نسبی ۰٪، ۶۰٪ و ۱۰۰٪ برای کاند و ۰٪ و ۱۰۰٪ برای آند، شش آزمایش طراحی شده است. این آزمایش‌ها در شرایط دمای گازهای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد، فشار ۱ اتمسفر و استوکیومتری‌های کاند و آند به ترتیب برابر ۲/۵ و ۱/۶ انجام شده است.

در آزمایش‌های بررسی تأثیر دمای گازهای ورودی بر عملکرد پیل، تعداد پنج آزمایش طراحی شده است که هر آزمایش دمای گازهای ورودی متفاوتی دارد. این آزمایش‌ها در شرایط فشار ۱ اتمسفر، استوکیومتری ۲/۵ در کاند و استوکیومتری ۱/۶ در آند و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ گازهای ورودی کاند و آند انجام شده است.



(الف)



(ب)

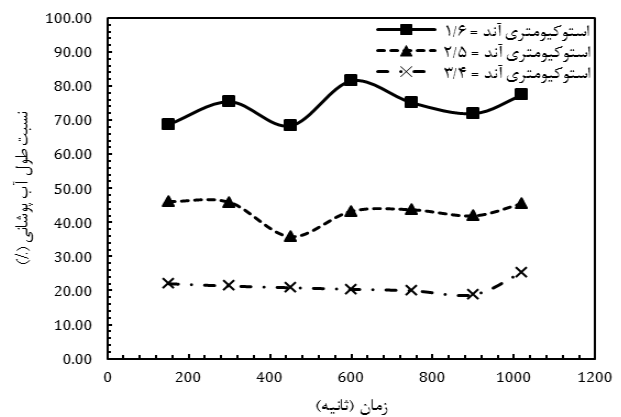


(ج)

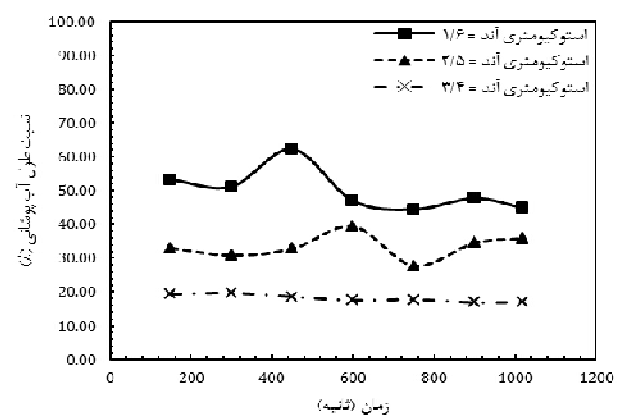
شکل ۴ (الف) نواحی مختلف شناسایی شده در تصاویر، (ب) تصویر کانال کاند، (ج) آب مایع موجود در کانال کاند

1- Back diffusion

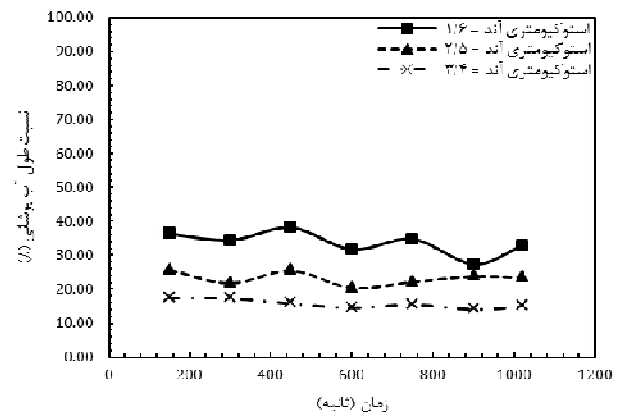
پلیمری تک مارپیچ بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد می‌باشد.



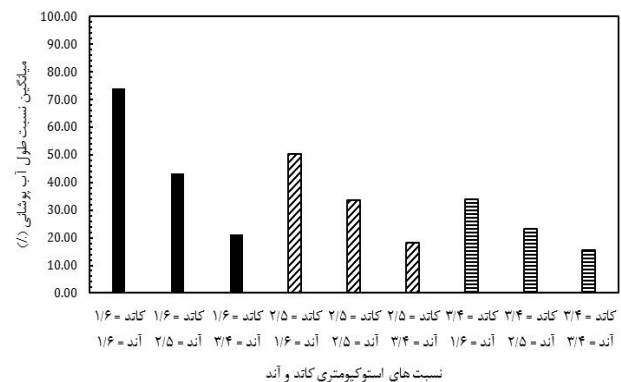
شکل ۵-الف نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری کاتد = ۱/۶)



شکل ۵-ب نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری کاتد = ۲/۵)



شکل ۵-ج نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری کاتد = ۳/۴)



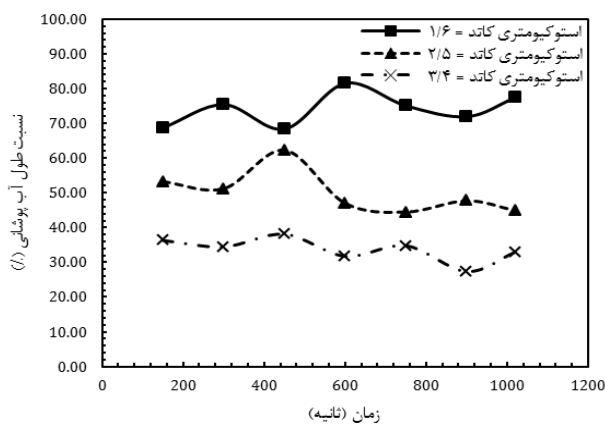
شکل ۶ میانگین نسبت طول آب پوشانی (براساس استوکیومتری کاتد)

با مقایسه شکل‌های ۶ و ۸، مشاهده می‌شود در صورتی که استوکیومتری کاتد را ثابت بگیریم، با افزایش استوکیومتری آند (شکل ۶)، میانگین نسبت طول آب پوشانی با شیب بیشتری نسبت به حالتی که استوکیومتری آند را ثابت بگیریم و نسبت استوکیومتری سمت کاتد را افزایش دهیم (شکل ۸)، کاهش می‌یابد؛ بنابراین به این نتیجه می‌رسیم که تأثیر استوکیومتری آند بر مدیریت آب کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی، بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد می‌باشد. با در نظر گرفتن پدیده الکترواسمزی که آب موجود در سمت آند را به کاتد انتقال می‌دهد و می‌تواند حجم آب انتقال شده توسط این پدیده چند برابر پدیده نفوذ معکوس باشد [۳۴]، این نتیجه قابل توجیه است. افزایش استوکیومتری آند می‌تواند میزان آب موجود در سمت آند را که در صورت وجود می‌تواند از طریق مکانیزم الکترواسمزی به سمت کاتد برود را کاهش دهد؛ بنابراین میزان انباشتگی آب نه تنها به استوکیومتری کاتد بلکه به استوکیومتری آند نیز بستگی دارد. در استوکیومتری‌های بالای کاتد و آند، به ترتیب تأثیر استوکیومتری آند و استوکیومتری کاتد بر مدیریت آب کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی کاهش می‌یابد.

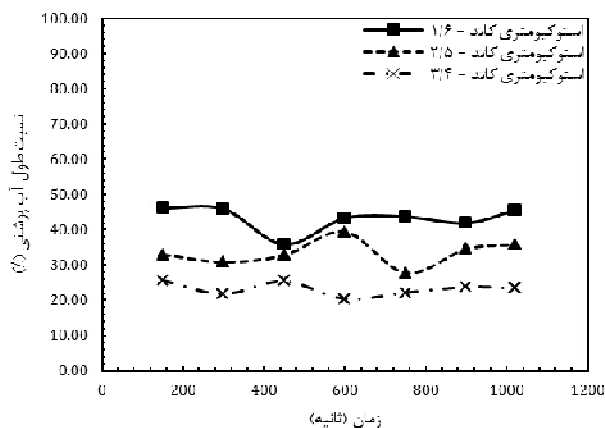
۵-۲- آزمایش‌های رطوبت نسبی

۵-۲-۱- آزمایش‌های رطوبت نسبی آند = ۰٪ (آند خشک)

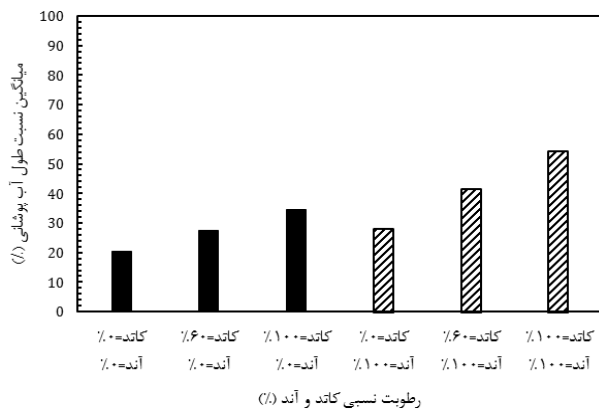
شکل ۹ نشان می‌دهد که در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با ثابت نگه داشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر ۰٪ (آند خشک) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، میزان نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد.



شکل ۷-الف نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری آند = ۱/۶)



شکل ۷-ب نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری آند = ۲/۵)



شکل ۱۱ میانگین نسبت طول آب پوشانی (آزمایش‌های رطوبت نسبی)

با بررسی شکل ۱۱ به این نتیجه می‌رسیم که در حالت میانگین زمانی، با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر مقدار ۰٪ (آند خشک) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، میانگین نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد.

۵-۲-۲- آزمایش‌های رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب)

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد.

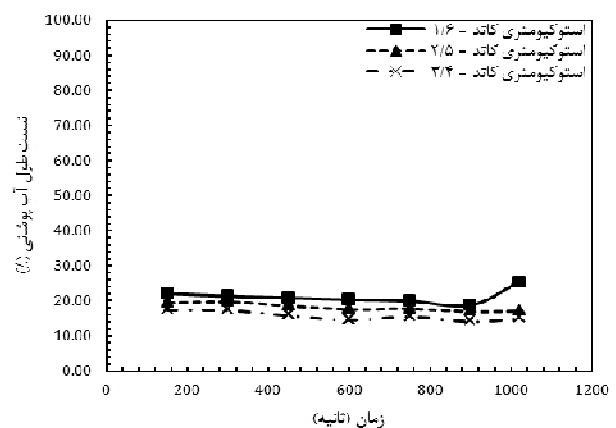
با بررسی شکل ۱۱ به این نتیجه می‌رسیم که در حالت میانگین زمانی، با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، میانگین نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد.

۵-۲-۳- مقایسه نتایج آزمایش‌های رطوبت نسبی آند = ۰٪ و ۱۰۰٪ (آند خشک و آند کاملاً مرطوب)

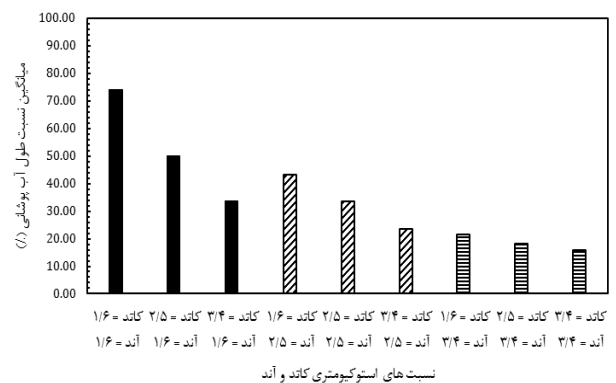
با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰، مشاهده می‌شود که در حالت آند کاملاً مرطوب (رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪، شکل ۱۰) مقادیر اختلاف بیشتری نسبت به حالت آند خشک (رطوبت نسبی آند = ۰٪، شکل ۹) دارند. این تفاوت به این دلیل است که تأثیر افزایش رطوبت نسبی کاتد بر مدیریت آب کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در طول زمان (حالت نا پایا) در حالت آند کاملاً مرطوب (رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪، شکل ۱۰) بیشتر از حالت خشک (رطوبت نسبی آند = ۰٪، شکل ۹) می‌باشد.

با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در حالت آند کاملاً مرطوب (رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪) مقادیر میانگین نسبت طول آب پوشانی اختلاف بیشتری نسبت به حالت آند خشک (رطوبت نسبی آند = ۰٪) دارند و این امر بدین صورت قابل تعبیر می‌باشد که تأثیر افزایش رطوبت نسبی کاتد بر مدیریت آب کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی، در حالت آند کاملاً مرطوب (رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪) بیشتر از حالت آند خشک (رطوبت نسبی آند = ۰٪) می‌باشد.

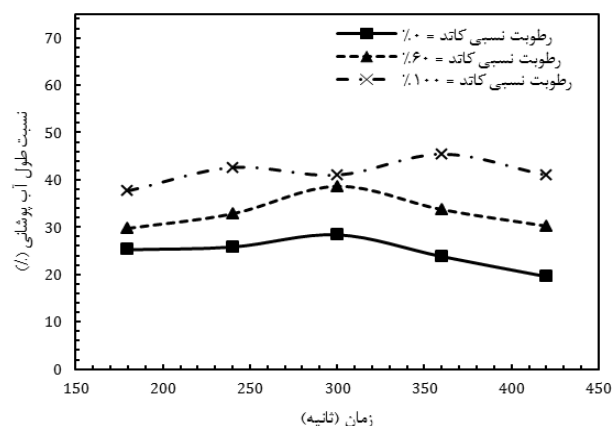
با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت کاتد و افزایش رطوبت نسبی سمت آند از ۰٪ (آند خشک) به ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب)، میانگین نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش نفوذ معکوس ناشی از افزایش رطوبت نسبی سمت آند از ۰٪ (آند خشک) به ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب) می‌باشد، زیرا در حالتی که رطوبت نسبی سمت آند ۰٪ (آند خشک) باشد، آند کاملاً خشک می‌باشد و تغییرات غلظت کاتد و آند زیاد می‌باشد و گرادیان غلظت از سمت کاتد به آند می‌باشد. بنابراین مقداری از آب مایع سمت کاتد توسط مکانیزم نفوذ معکوس به سمت آند منتقل می‌شود و



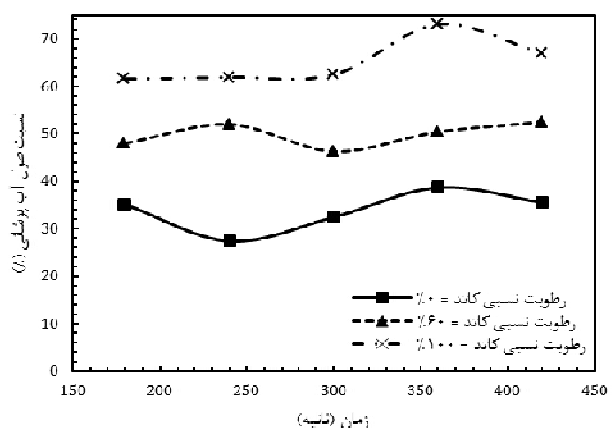
شکل ۷-ج نسبت طول آب پوشانی (استوکیومتری آند = ۳/۴)



شکل ۸ میانگین نسبت طول آب پوشانی (براساس استوکیومتری آند)



شکل ۹ نسبت طول آب پوشانی (رطوبت نسبی آند = ۰٪)

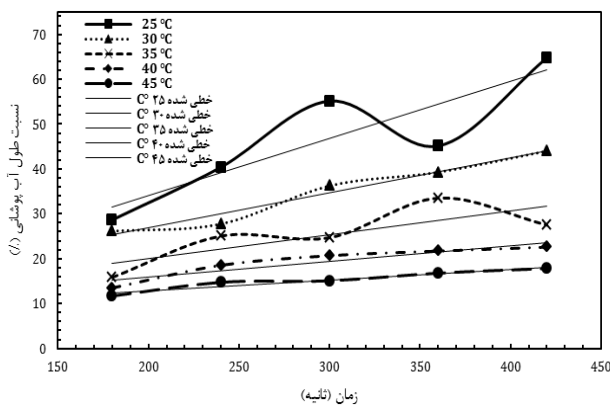


شکل ۱۰ نسبت طول آب پوشانی (رطوبت نسبی آند = ۱۰۰٪)

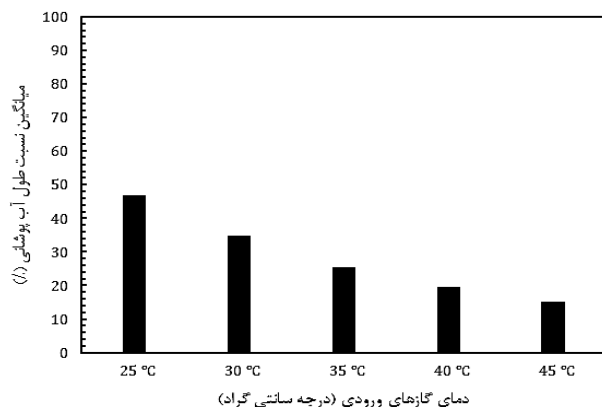
است. همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد، مقادیر مربوط به سری اول و دوم دارای تفاوت کمی می‌باشند.

۵-۵- بررسی تأثیر محتوای آب و پدیده طغیان بر ولتاژ پیل

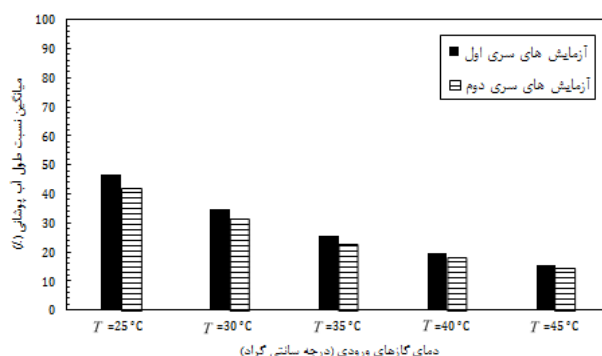
در شکل ۱۵، نمودار ولتاژ پیل در حالت ناپایا در شرایط استوکیومتری ۲/۵ در کاتد و استوکیومتری ۱/۶ در آنود و رطوبت نسبی ۱۰۰٪ و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد گازهای ورودی کاتد و آنود انجام شده است. همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد، ولتاژ پیل نوسانات زیادی دارد که ناشی از طغیان گذرا در کانال می‌باشد؛ به عبارت دیگر، با تشکیل یک توده مسدود کننده کانال، این توده آب شروع به حرکت می‌کند و در نتیجه مقداری از آب سر راه خود را با خود به سمت خروجی حمل کند. در طی این زمان کوتاه که پدیده طغیان رخ می‌دهد، ولتاژ پیل کاهش می‌یابد و پس از برطرف شدن انسداد و خروج آب از کانال، با نفوذ گازهای واکنش به مکان‌هایی از لایه نفوذ گاز که به واسطه طغیان مسدود شده بودند، ولتاژ پیل افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲ نسبت طول آب پوشانی (آزمایش‌های دمای گازهای ورودی)



شکل ۱۳ میانگین نسبت طول آب پوشانی (آزمایش‌های دمای گازهای ورودی)



شکل ۱۴ بررسی تکرارپذیری نسبت طول آب پوشانی آزمایش‌های دمای گازها

در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده در سمت کاتد به‌صورت میانگین کاهش می‌یابد؛ ولی در حالتی که رطوبت نسبی سمت آنود برابر ۱۰۰٪ (آنود کاملاً مرطوب) باشد، آنود کاملاً مرطوب می‌باشد و گردان غلظت در صورت وجود از سمت آنود به کاتد می‌باشد، بنابراین مکانیزم نفوذ معکوس موجود نمی‌باشد و مکانیزم درگ الکترواستتیک مکانیزم غالب انتقال آب می‌باشد.

همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت کاتد و افزایش رطوبت نسبی آنود از حالت ۰٪ (آنود خشک) به ۱۰۰٪ (آنود کاملاً مرطوب)، میانگین نسبت طول آب پوشانی افزایش می‌یابد و شیب این افزایش میانگین نسبت طول آب پوشانی با افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد (که در مقایسه هر جفت نمودار ثابت فرض شده است) بیشتر می‌شود.

۵-۳- آزمایش‌های دمای گازهای ورودی

در شکل ۱۲، نسبت طول آب پوشانی آزمایش‌های دمای گازهای ورودی آورده شده است. با بررسی شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که در تمامی زمان‌ها (در حالت ناپایا)، با افزایش دمای گازهای ورودی، نسبت طول آب پوشانی و در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده در کانال کاتد کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش دمای گازهای ورودی می‌باشد، زیرا با افزایش دمای گازهای ورودی و با توجه به واکنش گرمای الکتروشیمیایی درون پیل، رطوبت نسبی کاهش می‌یابد و میعان رطوبت موجود در گازهای ورودی کاهش می‌یابد و امکان تبخیر آب موجود در کانال کاتد افزایش می‌یابد.

با خطی‌سازی شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که روند نسبت طول آب پوشانی در طول زمان (حالت ناپایا)، افزایشی است و با افزایش دمای گازهای ورودی، نسبت طول آب پوشانی و در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده با شیب کمتری افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش دما، شیب افزایش نسبت طول آب پوشانی، کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر با افزایش دما، تأثیر دمای گازهای ورودی بر مدیریت آب کانال کاتد پیل-سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در طول زمان (حالت ناپایا)، کاهش می‌یابد. با بررسی شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای گازهای ورودی، میانگین نسبت طول آب پوشانی، کاهش می‌یابد و به‌طور میانگین میزان آب مایع کمتری در کانال کاتد انباشته می‌شود. این امر با توجه به تأثیر افزایش دمای گازهای ورودی بر رطوبت نسبی گاز ورودی قابل توجیه است. با افزایش دمای گازهای ورودی، ظرفیت جذب آب در گازهای ورودی افزایش می‌یابد و رطوبت نسبی کاهش می‌یابد و امکان میعان رطوبت موجود در گازهای ورودی کاهش می‌یابد و همچنین امکان تبخیر آب موجود در کانال کاتد افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش دما، شیب کاهش میانگین نسبت طول آب پوشانی، کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر با افزایش دما، تأثیر دمای گازهای ورودی بر مدیریت آب کانال کاتد پیل سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی، کاهش می‌یابد.

۵-۴- بررسی تکرارپذیری و صحت سنجی آزمایش‌ها

برای در نظر گرفتن خطای فردی و خطای آزمایش، تکرارپذیری هر کدام از آزمایش‌ها با انجام ۲ آزمایش در روزهای مختلف و توسط اپراتورهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که محل انباشت آب مایع و تشکیل قطرات آب، در آزمایش‌های سری اول و دوم متفاوت می‌باشد ولی مقادیر نسبت طول آب پوشانی مربوط به سری دوم آزمایش‌ها کمتر از ۸٪ با مقادیر آزمایش‌های سری اول تفاوت دارد و در نتیجه آزمایش‌ها با دقت مناسبی انجام شده است. برای نمونه، نتایج این دو سری، برای آزمایش‌های بررسی تأثیر دمای گازهای ورودی بر عملکرد پیل در شکل ۱۴ آورده شده

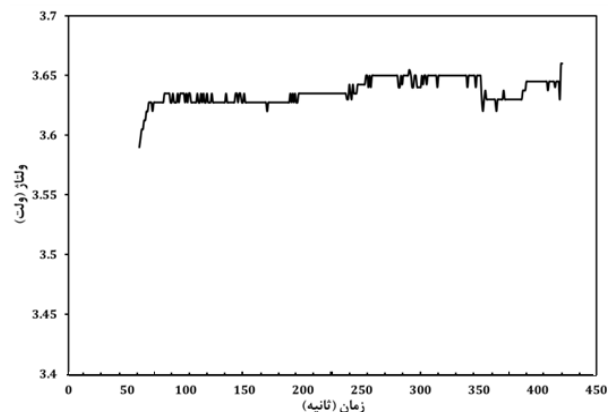
۱- با افزایش استوکیومتری کاند و آند، میزان آب تجمع یافته در کانال سمت کاند در طول زمان (حالت ناپایا) و همچنین میانگین زمانی آن، کاهش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری سمت کاتد، تأثیر افزایش استوکیومتری آند بر روی نسبت طول آب‌پوشانی و میانگین زمانی آن و در نتیجه میزان آب انباشته شده در کانال کاتد، کمتر می‌شود. با افزایش استوکیومتری سمت آند، تأثیر افزایش استوکیومتری کاتد نیز بر میزان آب انباشته شده در کانال کاتد کمتر می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در حالات نا پایا و میانگین زمانی، تأثیر استوکیومتری آند بر مدیریت آب، بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد در پیل سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ می‌باشد.

۲- در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با ثابت نگهداشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر ۰٪ (آند خشک) یا ۱۰۰٪ (آند کاملاً مرطوب) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، میزان نسبت طول آب‌پوشانی و همچنین میانگین زمانی آن و در نتیجه میانگین میزان آب انباشته شده در کانال کاتد، افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش رطوبت نسبی کاتد بر مدیریت آب در طول زمان (حالت نا پایا) و میانگین زمانی، در حالت آند کاملاً مرطوب بیشتر از حالت آند خشک می‌باشد. با ثابت نگهداشتن رطوبت نسبی سمت کاتد و افزایش رطوبت نسبی آند، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی و انباشت آب در کانال کاتد افزایش می‌یابد و شیب این افزایش با افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، بیشتر می‌شود.

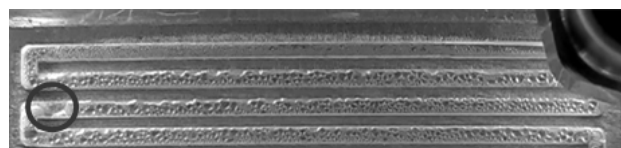
۳- در تمامی زمان‌ها و در حالت میانگین زمانی، با افزایش دمای گازهای ورودی، به‌ترتیب، نسبت طول آب‌پوشانی و میانگین زمانی آن و در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده در کانال کاهش می‌یابد. در طول زمان، نسبت طول آب‌پوشانی برای تمامی دماهای ورودی افزایش یافته درحالی که با افزایش دما، شیب نسبت طول آب‌پوشانی، کاهش می‌یابد. با افزایش دما، شیب کاهش میانگین نسبت طول آب‌پوشانی، کاهش می‌یابد؛ بنابراین، با افزایش دما، تأثیر دمای گازهای ورودی بر مدیریت آب در حالت‌های نا پایا و میانگین زمانی، کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [1] S. G. Kandlikar, Micro scale and macro scale aspects of water management challenges in PEM fuel cells, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 29, No. 7, pp. 575-587, 2008.
- [2] R. Anderson, L. Zhang, Y. Ding, M. Blanco, X. Bi, D. P. Wilkinson, A critical review of two-phase flow in gas flow channels of proton exchange membrane fuel cells, *Power Sources*, Vol. 195, No. 15, pp. 4531-4553, 2010.
- [3] H. Li, Y. Tang, Z. Wang, Z. Shi, S. Wu, D. Song, J. Zhang, K. Fatih, J. Zhang, H. Wang, Z. Liu, R. Abouattallah, A. Mazza, A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell, *Power Sources*, Vol. 178, No. 1, pp. 103-117, 2008.
- [4] J. P. Owejan, J. J. Gagliardo, J. M. Sergi, S. G. Kandlikar, T. A. Trabold, Water management studies in PEM fuel cells, part i: fuel cell design and in situ water distributions, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 8, pp. 3436-3444, 2009.
- [5] D. Spornjak, A. K. Prasad, S. G. Advani, Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine pem fuel cell, *Power Sources*, Vol. 170, No. 2, pp. 334-344, 2007.
- [6] K. Tüber, D. Póca, C. Hebling, C. Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell, *Power Sources*, Vol. 124, No. 2, pp. 403-414, 2003.
- [7] K. Sugiura, M. Nakata, T. Yodo, Y. Nishiguchi, M. Yamauchi, Y. Itoh, Evaluation of a cathode gas channel with a water absorption layer/waste channel in a PEFC by using visualization technique, *Power Sources*, Vol. 145, No. 2, pp. 526-533, 2005.
- [8] F. Y. Zhang, X. G. Yang, C. Y. Wang, Liquid water removal from a polymer electrolyte fuel cell, *Electrochemical Society*, Vol. 153, No. 2, pp. A225-A232, 2006.
- [9] A. Su, F. Weng, C. Hsu, Y. Chen, Studies on flooding in PEM fuel cell cathode channels, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 8, pp. 1031-1039, 2006.



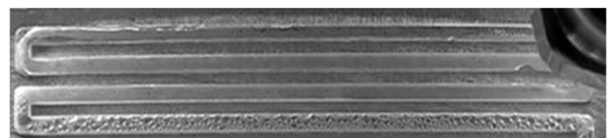
شکل ۱۵ ولتاژ پیل در حالت نا پایا



شکل ۱۶ پدیده طغیان (توده مسدود کننده با دایره مشخص شده است)



(الف)



(ب)

شکل ۱۷ (الف) توده متحرک در حال خروج، (ب) تصویر کانال پس از خروج توده

همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد، در لحظه ۳۶۰ (ثانیه) ولتاژ پیل افت می‌نماید. این امر به دلیل انسداد کانال به وسیله یک توده آب مایع و رخ دادن طغیان می‌باشد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در این لحظه نسبت طول آب‌پوشانی زیاد می‌باشد و یک توده تشکیل شده است که این امر در شکل ۱۶ قابل مشاهده می‌باشد. سپس این توده شروع به حرکت می‌نماید و قسمتی از آب پیل تخلیه می‌شود که همان‌طور در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نسبت طول آب‌پوشانی پس از این لحظه کاهش می‌یابد و قسمتی از آب مایع پیل به وسیله این توده متحرک تخلیه می‌شود که این امر در شکل ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۱۷-الف، دور توده متحرک خط کشیده شده است و در شکل ۱۷-ب تصویر کانال پس از خروج آب از کانال به وسیله توده متحرک و جریان گاز، آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد، در نتیجه ب‌رطرف شدن انسداد کانال و نفوذ گاز به نواحی مسدود شده، ولتاژ پیل به تدریج شروع به افزایش می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تعدادی از عوامل تأثیرگذار بر مدیریت آب در پیل سوختی غشا پلیمری شفاف که عبارت‌اند از: استوکیومتری کاتد و آند، رطوبت نسبی کاتد و آند و دمای گازهای ورودی، با استفاده از روش تصویربرداری اپتیکال، به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از پژوهش در ادامه آورده می‌شود:

- [23] T. Mukaide, S. Mogi, J. Yamamoto, A. Morita, S. Koji, K. Takada, K. Uesugi, K. Kajiwara, T. Noma, In situ observation of water distribution and behaviour in a polymer electrolyte fuel cell by synchrotron x-ray imaging, *Synchrotron Radiation*, Vol. 15, No. 4, pp. 329-334, 2008.
- [24] S. Tsushima, K. Teranishi, S. Hirai, Magnetic resonance imaging of the water distribution within a polymer electrolyte membrane in fuel cells, *ECS Solid-State Letters*, Vol. 7, No. 9, pp. A269-A272, 2004.
- [25] K. Teranishi, S. Tsushima, S. Hirai, Study of the effect of membrane thickness on the performance of polymer electrolyte fuel cells by water distribution in a membrane, *ECS Solid-State Letters*, Vol. 8, No. 6, pp. A281-A284, 2005.
- [26] S. Tsushima, K. Teranishi, S. Hirai, Water diffusion measurement in fuel-cell spe membrane by nmr, *Energy*, Vol. 30, No. 2-4, pp. 235-245, 2005.
- [27] S. Tsushima, K. Teranishi, K. Nishida, S. Hirai, Water content distribution in a polymer electrolyte membrane for advanced fuel cell system with liquid water supply, *Magnetic Resonance Imaging*, Vol. 23, No. 2, pp. 255-258, 2005.
- [28] J. P. Owejan, T. A. Trabold, D. L. Jacobson, D. R. Baker, D. S. Hussey, M. Arif, In situ investigation of water transport in an operating pem fuel cell using neutron radiography: part 2-transient water accumulation in an interdigitated cathode flow field, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 25-26, pp. 4721-4731, 2006.
- [29] T. A. Trabold, J. P. Owejan, D. L. Jacobson, M. Arif, P. R. Huffman, In situ investigation of water transport in an operating pem fuel cell using neutron radiography: part 1-experimental method and serpentine flow field results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 25-26, pp. 4712-4720, 2006.
- [30] M. M. Mench, Q. L. Dong, C. Y. Wang, In situ water distribution measurements in a polymer electrolyte fuel cell, *Power Sources*, Vol. 124, No. 1, pp. 90-98, 2003.
- [31] X. G. Yang, N. Burke, C. Y. Wang, K. Tajiri, K. Shinohara, Simultaneous measurements of species and current distributions in a pefc under low-humidity operation, *Electrochemical Society*, Vol. 152, No. 4, pp. A759-A766, 2005.
- [32] A. Bazylak, Liquid Water visualization in pem fuel cells: a review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 9, pp. 3845-3857, 2009.
- [33] J. St-Pierre, PEMFC In situ liquid-water-content monitoring status, *Electrochemical Society*, Vol. 154, No. 7, pp. B724-B731, 2007.
- [34] M. M. Mench, *Fuel cell Engines*, pp. 47, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [10] S. Ge, C. Y. Wang, Liquid water formation and transport in the PEFC anode, *Electrochemical Society*, Vol. 154, No. 10, pp. B998-B1005, 2007.
- [11] X. Liu, H. Guo, F. Ye, C. F. Ma, Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells, *Electrochimica Acta*, Vol. 52, No. 11, pp. 3607-3614, 2007.
- [12] X. Liu, H. Guo, F. Ye, C. F. Ma, Flow dynamic characteristics in flow field of proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 3, pp. 1040-1051, 2008.
- [13] T. Ous, C. Arcoumanis, Visualization of water accumulation in the flow channels of PEMFC under various operating conditions, *Power Sources*, Vol. 187, No. 1, pp. 182-189, 2009.
- [14] D. Spornjak, S. G. Advani, A. K. Prasad, Simultaneous neutron and optical imaging in pem fuel cells, *Electrochemical Society*, Vol. 156, No. 1, pp. B109-B117, 2009.
- [15] I. S. Hussaini, C. Y. Wang, Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells, *Power Sources*, Vol. 187, No. 2, pp. 444-451, 2009.
- [16] J. M. Sergi, S. G. Kandlikar, Quantification and characterization of water coverage in PEMFC gas channels using simultaneous anode and cathode visualization and image processing, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 19, pp. 12381-12392, 2011.
- [17] M. I. Rosli, D. J. Borman, D. B. Ingham, M. S. Ismail, L. Ma, M. Pourkashanian, Transparent PEM fuel cells for direct visualization experiments, *Fuel Cell Science and Technology*, Vol. 7, No. 6, pp. 61015-21, 2010.
- [18] Z. Zhan, C. Wang, W. Fu, Mu Pan, Visualization of water transport in a transparent PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 1, pp. 1094-1105, 2012.
- [19] E. Afshari, S. A. Jazayeri, Performance analysis of a polymer electrolyte fuelcell system for automotive application, *The Journal of Engine Research*, Vol. 16, No. 16, pp. 3-15, 2009. (In Persian)
- [20] R. Roshandel, B. Farhaniye, Simulation of water management in the pemfc, in *The 17th International Power System Conference*, Tehran, Iran, 2002. (In Persian)
- [21] M. Rashidi Benam, M. Samipoor, A. Jamekhorshid, Investigation of flooding in the pemfc by mathematical model of catalyst Layer, in *The 2nd Conference of Hydrogen and Fuel Cell*, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [22] J. O'rourke, M. Ramani, M. Arcak, In situ detection of anode flooding of a pem fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 16, pp. 6765-6770, 2009.