مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۵، ص‌ص ۳۳-۴۳

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی تأثیر پارامترهای جریان ورودی بر عملکرد پیل‌سوختی غشا پلیمری

علی بزرگ‌نژاد[۱]، مهرزاد شمس[۲*]، همایون کنعانی[۳]، محمّدرضا هاشمی‌نسب[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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۲۵ آبان ۱۳۹۲
پذیرش: ۰۴ دی ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۴ خرداد ۱۳۹۳

کلید واژگان:
پیل‌سوختی غشا پلیمری
آب
تصویربرداری اپتیکال
نسبت طول آب‌پوشانی
حالت ناپایا

چکیده

وجود آب در پیل‌سوختی غشا پلیمری به‌دلیل تأمین رطوبت مورد نیاز غشا جهت تأمین رسانایی یونی ضروری می‌باشد؛ ولی انباشت بیش از اندازه آب مایع در پیل که به‌عنوان پدیده طغیان شناخته می‌شود، به‌دلیل کاهش تعداد مسیرهای گازهای واکنش‌دهنده در لایه نفوذ گاز و مکان‌های واکنش لایه کاتالیست و افزایش افت انتقال جرم، باعث افت عملکرد پیل می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از تصویربرداری اپتیکال، جریان دو فاز درون کانال جریان کاتد یک پیل‌سوختی غشا پلیمری شفاف با کانال تک مارپیچ به‌صورت ناپایا و میانگین زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت طول آب‌پوشانی و میانگین زمانی آن، که به ترتیب معیاری از آب مایع موجود در هر لحظه و میانگین زمانی آن در کانال جریان کاتد می‌باشد، محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش استوکیومتری، کاهش رطوبت نسبی و افزایش دمای گازهای ورودی در دو سمت کاتد و آند، میزان آب مایع انباشته شده در کانال جریان کاتد در حالت‌های نا پایا و میانگین زمانی کاهش می‌یابد. در حالات نا پایا و میانگین زمانی، تأثیر استوکیومتری آند بر میزان آب مایع انباشته شده در کانال کاتد، بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد می‌باشد.

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

Ali Bozorgnezhad[1], Mehrzad Shams[2*], Homayoon Kanani[3], Mohammad Reza Hashemi Nasab[4]

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

امروزه پیل‌های سوختی، به‌دلیل خصوصیات ویژه‌ی خود، از سوی تولیدکنندگان خودرو بیش از پیش به عنوان یک جایگزین بالقوه موتورهای احتراق داخلی، مورد توجه قرارگرفته‌اند. پیل‌های سوختی غشا پلیمری[۱] به دلیل چگالی جریان بالا و شروع به کار سریع به‌عنوان محبوب‌ترین فناوری پیل‌های سوختی در کاربردهای حمل و نقل مطرح می‌باشند. مدیریت آب به‌عنوان یک موضوع بسیار ضروری در پیشرفت پیل‌های سوختی غشا پلیمری مطرح می‌باشد. آب مایع در پیل‌سوختی از دو طریق انجام واکنش الکتروشیمیایی تولید آب و تقطیر رطوبت موجود در گازهای ورودی به وجود

1- PEMFC

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 پیل‌سوختی باعث کاهش قابل ملاحظه انتقال جرم، عملکرد و دوام پیل-سوختی می‌گرددکه این پدیده طغیان[1] 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 به‌ترتیب وارد قسمت‌های آند و کاتد پیل‌سوختی می-گردد. سپس گازها از طریق محیط متخلخل لایه نفوذ گاز وارد مکان‌های واکنش در لایه کاتالیست می‌گردد. در الکترود آند، 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 الکتریسیته، از طریق یک مدار خارجی به سمت الکترود کاتد منتقل می‌گردد. الکترون‌ها در سطح لایه کاتالیست سمت کاتد با یون H^+ و اکسیژن ترکیب می‌شوند و آب تولید می‌گردد.

واکنش‌هایی که در پیل‌سوختی غشا پلیمری رخ می‌دهد عبارت است از:

(۱-الف) واکنش الکترود آند $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

(۱-ب) واکنش الکترود کاتد $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

(۱-ج) واکنش کلی $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

در حالت طغیان مربوط به کانال‌های جریان، آب مایع انباشته شد هدر کانال-های جریان به شکل جریان قطرات بزرگ[2]، حلقوی[3]، توده‌ای[4] و یا مانع[5] 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 پیل‌سوختی غشا پلیمری و در نتیجه محدود شدن واکنش‌های شیمیایی و در نهایت کاهش قابل ملاحظه کارایی و توان پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی غشا پلیمری جهت مرطوب بودن و رسانایی یونی غشا ضروری می‌باشد؛ ولی انباشت آب مایع در پیل، منجر به پدیده طغیان در پیل می گردد که این پدیده کاهش کارایی و دوام پیل را درپی دارد[۱-۵]. انواع اصلی طغیان در پیل‌سوختی 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 واکنش‌دهنده‌ها و پخش مناسب آن‌ها درون لایه نفوذ گاز و محدود کردن کارآیی پیل به‌دلیل 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[6] پیل‌سوختی با بدنه شفاف، یک روش متداول بررسی و مشاهده کانال‌های جریان پیل‌سوختی غشا پلیمری می‌باشد، درحالی که تعداد بسیار محدودی بررسی اپتیکی، توانایی به‌دست آوردن اطلاعات کمّی مربوط به میزان تجمّع آب مایع و جریان دو فاز موجود در کانال‌های جریان را داشته‌اند[۲].

در این پژوهش، بررسی اپتیکال یک پیل‌سوختی غشا پلیمری شفاف با استفاده از یک دوربین سرعت بالا[7] جهت بررسی جریان دو فاز کانال جریان کاتد و به‌دست آوردن اطلاعات کمّی مورد نیاز، انجام شده است. آب مایع موجود در کانال با تکنیک‌های پردازش تصاویر دیجیتال[8] 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 آب‌پوشانی" 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 آب‌پوشانی در طول زمان، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی محاسبه می‌شود. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش در زمینه‌های زیر سودمند خواهد بود:

۱- بررسی دقیق‌تر آب مایع در کانال‌های پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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[9]، 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

1- Flooding
2- Large droplet
3- Annular
4- Slug
5- Plug
6- Optical Visualization
7- High speed camera
8- Digital Image Processing (DIP)
9- WAL (Water Absorption Layer)

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 پیل‌سوختی غشا پلیمری شفاف را جهت بررسی تولید آب مایع و پدیده طغیان در سمت آند مورد بررسی قراردادند. 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 پیل‌سوختی 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 به‌دلیل 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 پیل‌سوختی و نرخ جریان کاتد و زمان عملکرد روی جریان دو فاز جریان و مایع در پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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.

اسپرنجک و همکارانش[۱۴] یک روش جدید برای بررسی پدیده طغیان در پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی پلیمری شفاف مورد بررسی اپتیکی قراردادند. 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 پیل‌سوختی 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 پیل‌سوختی 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 به‌دلیل افزایش مقاومت یونی، کاهش می‌یابد.

ژان و همکارانش[۱۸] با بررسی یک پیل‌سوختی 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 قراردادند. 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، به‌دلیل پدیده‌ی طغیان کاهش می‌یابد.

۳- انواع روش‌های بررسی مدیریت آب

جهت بررسی بهتر طغیان در کانال‌ها و اثر آن بر روی عملکرد پیل‌سوختی، انواع مختلفی از روش‌های بررسی، شناسایی و تشخیص آب مایع در پیل‌سوختی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: ۱- مقاومت فرکانس بالا[1][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[2][۲۳]، رزونانس مغناطیسی[3][۲۴-۲۷]، پرتونگاری نوترونی[4][۴،۵، ۲۸،۲۹]، کروماتوگرافی گاز[5][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 به‌دست 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 پیل‌سوختی فراهم کند[۳۲].

در روش رزونانس مغناطیسی، یک هسته اتم[6] توسط میدان مغناطیسی با با فرکانس خاصی بر انگیخته می‌شود و پس از عبور از پیل‌سوختی با بررسی فرکانس جدید این هسته، میزان آب موجود در پیل‌سوختی 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 کمّی وجود آب مایع در کانال‌های جریان، لایه نفوذ گاز، غشا سرهم شده با الکترود 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 (به‌صورت 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 الکترود) قرار دارد، سخت می‌باشد. همچنین کاربرد این روش به‌دلیل تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی (به‌ترتیب حدوداً ۲۵ میکرومتر و ۵/۴ ثانیه [۳۲]) محدود می‌باشدکه 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

علاوه خطاهای کالیبراسیون منجر به‌بررسی با دقّت کمتر در پیل‌های در حال کارکرد می‌گردد[۱۴]. همچنین استفاده از این روش به‌دلیل 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 حالاتی کاربرد دارد که آب تولیدی زیاد باشد[۳۰-۳۱].

بررسی اپتیکی به‌عنوان 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 پیل‌سوختی شود و همچنین در انتخاب مواد مورد استفاده در ساخت پیل‌سوختی، مورد استفاده قرار گیرد. این روش امکان بررسی مستقیم عملکرد پیل‌سوختی، 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.

به‌دلیل 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 پیل‌سوختی و دستگاه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، یک پیل‌سوختی شفاف با امکان دستیابی اپتیکی به کانال جریان سمت کاتد، جهت بررسی تصاویر کانال این سمت، تهیه شده است. سطح فعال پیل‌سوختی $5\times5cm^2$ می‌باشد که در کاربردهای قابل حمل مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین یک سیستم دوربین سرعت بالای کاسیو مدل ای ایکس-اف۱، جهت تصویربرداری و مشاهده‌ی جریان دو فاز در سمت کاتد کانال پیل‌سوختی در هنگام عملکرد تعبیه شده است. این مجموعه آزمایشگاهی اطلاعات مربوط به شناسایی و مقدار سنجی کمّی 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 پیل‌سوختی غشا پلیمری انجام شده است.

آزمایش‌ها توسط یک دستگاه تست پتانسیوستات و گالوانوستات و یک واحد مدیریت جریان گاز[1] انجام می‌شود. در آزمایش‌ها پیل به‌صورت ایستاده و کانال‌های جریان به‌صورت افقی می‌باشند. جریان در سمت کاتد و آند به‌صورت 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[2] اروپا تدوین شده است.

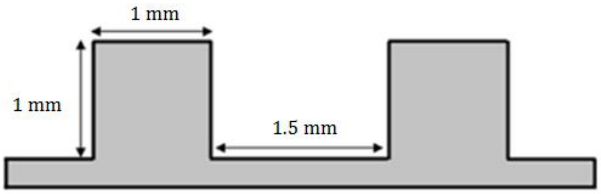
کانال جریان بر روی صفحات انتهایی و از جنس شفاف (پلکسی گلاس)[3] می‌باشد که امکان دستیابی اپتیکی به کانال جریان را فراهم می‌کند. عرض و ارتفاع کانال به‌ترتیب ۱/۵ و ۱ میلی‌متر می‌باشد و طول هر ردیف کانال ۴۸ میلی‌متر می‌باشد که در فاصله ۱ میلی‌متر از یکدیگر قرار دارند. ابعاد کانال‌های کاتد و آند برابر یکدیگر 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 در حال عملکرد آمده است. گاز ورودی سمت کاتد 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[4]، لایه‌های کاتالیست[5]، لایه‌های نازک تخلخلی[6] تخلخلی[6] و غشا[7]) به‌صورت 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 به‌صورت تک مارپیچ و شامل ۲۱ ردیف افقی و ۲۰ زانویی می‌باشد. غشا پلیمری از جنس نفیون ۱۱۷[8] می‌باشد. غشا سرهم شده با الکترود[9]، 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 $0/4mg/cm^2$ و در سمت کاتد $0/6mg/cm^2$ می‌باشد. جهت آب-بندی و جلوگیری از نشتی گازهای واکنش دهنده در هر سمت کاتد و آند از یک حلقه پلاستیکی[10] 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 الکترود آمده است.

سیستم تصویربرداری شامل یک دوربین سرعت بالای کاسیو می‌باشد. این دوربین دارای تفکیک‌پذیری ۱۰۸۰×۱۹۲۰ مگا پیکسل[11] و نرخ فریم ۶۰ تا ۱۲۰۰ فریم بر ثانیه می‌باشد.

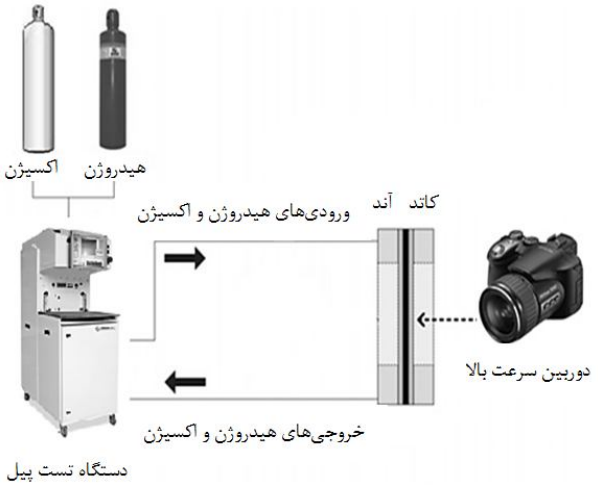
شکل ۱-الفکانال جریان سمت کاتد و محل ورودی و خروجی جریان اکسیژن



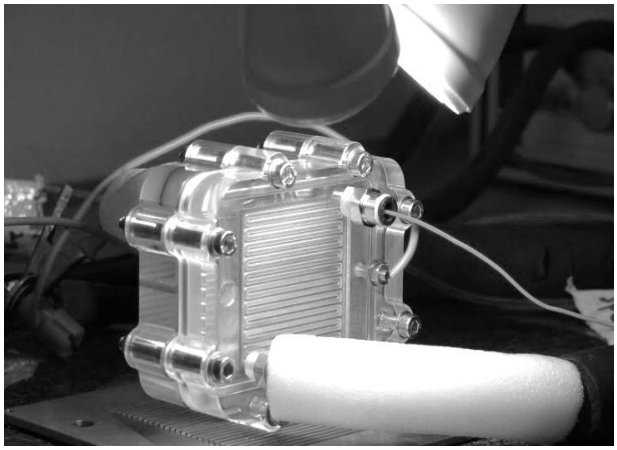
شکل ۱-ب ابعاد کانال‌های جریان

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

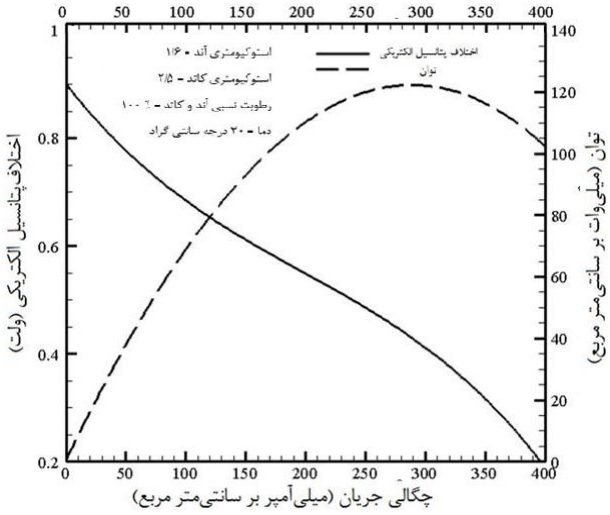
4- Gas Diffusion Layer (GDL)
5- Catalyst Layer (CL)
6- Micro Prous Layer (MPL)
7- CCM(Catalyst Coated Membrane)
8- Nafion
9- MEA(Membrane Electrode Assembly)
10- O-ring
11- Full HD



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[1] و و حداکثر کیفیت فیلم‌برداری در حالت فیلم‌برداری با پسوند موو[2] استفاده شده است.

سیستم نور پردازی یکی از اساسی‌ترین قسمت‌های این آزمایش می‌باشد.

1- RAW
2- Mov

به‌دلیل 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 تفکیک‌پذیری 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 ۰/۳ (آمپر بر سانتی‌مترمربع) صورت پذیرفته است. به‌دلیل استفاده از توری جمع‌کننده جریان بسیار نازک نیکلی که موجب مقاومت الکتریکی زیادتری نسبت به استفاده از صفحات فلزی جمع‌کننده جریان می‌شود و با توجه به محدوده‌ی پایین دمای کارکرد پیل به‌دلیل استفاده از صفحات پلکسی گلاس و همچنین نوع پیل مورد استفاده، در نمودار قطبش پیل (شکل ۳) بیشینه توان در نزدیکی چگالی جریان ۰/۳ (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 پیل‌سوختی غشا پلیمری را بر انباشته شدن آب در کانال جریان کاتد با یکدیگر مقایسه نمود. میزان آب تولیدی ناشی از واکنش الکتروشیمیایی (برحسب g_{H_2O}/s) با استفاده از قانون فارادی دوم فارادی در رابطه (۲) آمده است[۳۴].

$$\dot{m}_{gen} = \frac{iA}{2F} MW_{H_2O} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، i چگالی جریان، A سطح فعال، F ثابت فارادی و MW_{H_2O} وزن مولکولی آب می‌باشد.

در این پژوهش پارامتر "نسبت طول آب‌پوشانی" 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 آب‌پوشانی در طول زمان، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی 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[3] استفاده می‌شود. به‌صورت 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 پیل‌سوختی می‌باشد؛ ۳- ناحیه‌ای که مربوط به قطرات بسیار ریز ناشی از رطوبت تقطیرشده 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

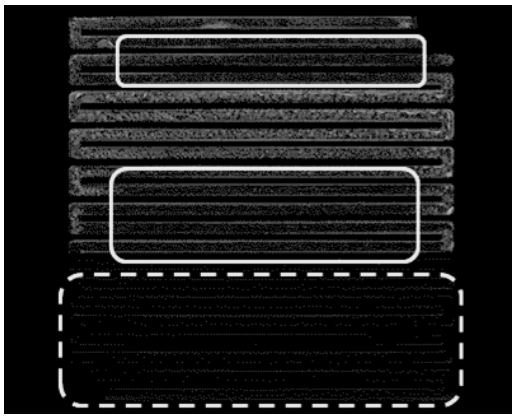
3- Morphological

(جریان مه‌گون) با مستطیل و نواحی آب مایع با رنگ سفید و بدون مستطیل محصورکننده مشخص‌شده‌اند. در شکل۴-ب، یک تصویر از کانال کاتد 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 درنظر 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 کاتد 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 ٪۱۰۰برای گازهای ورودی سمت کاتد و آند انجام شده است.

در آزمایش‌های بررسی تأثیر رطوبت نسبی بر عملکرد پیل، با درنظر گرفتن سه مقدار رطوبت نسبی ٪۰، ٪۶۰ و ٪۱۰۰ برای کاتد 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 کاتد و آند به‌ترتیب 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 کاتد و استوکیومتری ۱/۶ در آند و رطوبت نسبی ٪۱۰۰ گازهای ورودی کاتد و آند انجام شده است.



(الف)

(ب)

(ج)

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

۵-۱- آزمایش‌های استوکیومتری

۵-۱-۱- آزمایش‌های استوکیومتری کاتد ثابت

در این آزمایش‌ها مقدار استوکیومتری کاتد 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 کاتد 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 کاتد با مکانیزم نفوذ معکوس[1] از سمت کاتد به سمت آند انتقال می‌یابد و در نهایت آب انباشته شده در کانال کاتد کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج مشاهده می‌شود که با افزایش استوکیومتری کاتد که در هرکدام 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 کاتد، تأثیر افزایش استوکیومتری آند بر روی نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود. در شکل ۶، با ثابت نگه‌داشتن استوکیومتری کاتد و افزایش استوکیومتری آند، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری کاتد، تأثیر افزایش استوکیومتری آند بر میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود.

۵-۱-۲- 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 کاتد تغییر می‌کند. با بررسی شکل‌های ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج مشاهده می‌گردد که در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با ثابت نگه‌داشتن استوکیومتری آند و افزایش استوکیومتری کاتد، نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. این امر با توجه به افزایش نرخ جریان گاز کاتد در نتیجه افزایش استوکیومتری کاتد قابل توجیه می‌باشد، زیرا با توجه به افزایش نرخ جریان گاز سمت کاتد، میزان آب بیشتری از طریق جریان گاز خارج می‌شود و آب کمتری در کانال کاتد انباشته می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۷-الف، ۷-ب و ۷-ج مشاهده می‌شود که با افزایش استوکیومتری آند که در هرکدام 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 کاتد بر روی نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود به‌طوری که در شکل ۷-ج، مشاهده می‌شود با اینکه نسبت استوکیومتری سمت کاتد افزایش می‌یابد، هرسه سری مقادیر نسبت طول آب‌پوشانی، اختلاف بسیار کمی دارند.

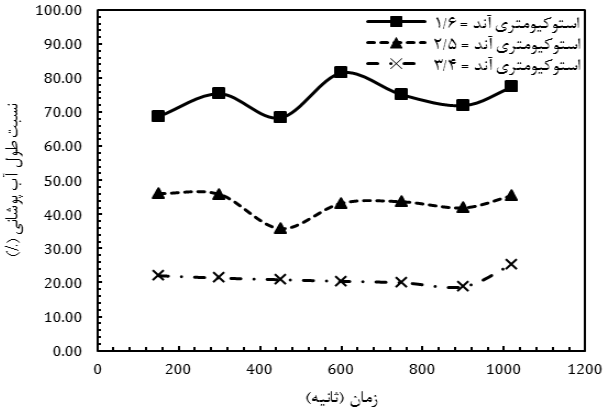
در شکل ۸، با ثابت نگه‌داشتن استوکیومتری آند و افزایش استوکیومتری کاتد، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کاهش می‌یابد. با افزایش استوکیومتری آند، تأثیر افزایش استوکیومتری کاتد بر روی میانگین نسبت طول آب‌پوشانی کمتر می‌شود.

۵-۱-۳- مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های استوکیومتریکاتد ثابت و آند ثابت

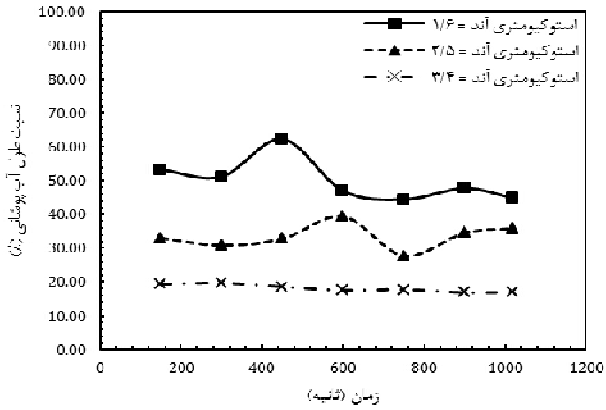
با مقایسه هر جفت از شکل‌های ۵ و ۷ (۵-الف با ۷-الف، ۵-ب با ۷-ب و ۵-ج با ۷-ج) مشخص می‌گردد که تغییرات استوکیومتری آند تأثیر بیشتری بر میزان نسبت طول آب‌پوشانی و در نتیجه میزان آب انباشته شده در کانال جریان کاتد، نسبت به تغییر استوکیومتری کاتد دارد و در نتیجه در حالت نا پایا، تأثیر استوکیومتری آند بر مدیریت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

1- Back diffusion

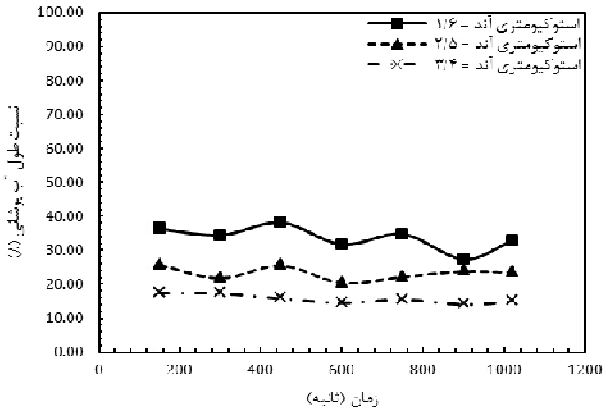
پلیمری تک مارپیچ بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد می‌باشد.



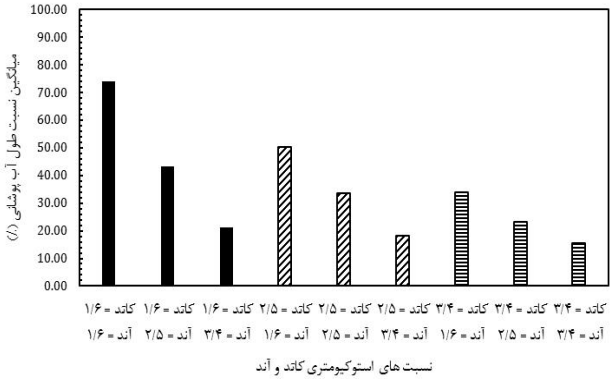
شکل ۵-الف نسبت طول آب‌پوشانی (استوکیومتری کاتد = ۱/۶)



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



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



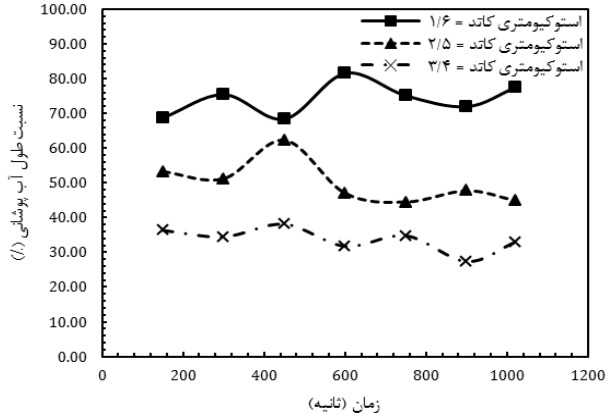
شکل ۶ میانگین نسبت طول آب‌پوشانی (براساس استوکیومتری کاتد)

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 آب‌پوشانی 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 پیل‌سوختی غشا پلیمری با کانال تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی، بیشتر از تأثیر استوکیومتری کاتد می‌باشد. با درنظر 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 درصورت 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، به‌ترتیب تأثیر استوکیومتری آند و استوکیومتری کاتد بر مدیریت آب کانال کاتد پیل‌سوختی غشا پلیمری با کانال تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی کاهش می‌یابد.

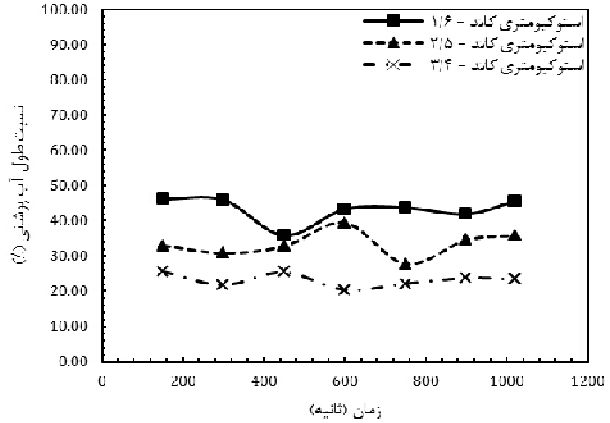
۵-۲- آزمایش‌های رطوبت نسبی

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

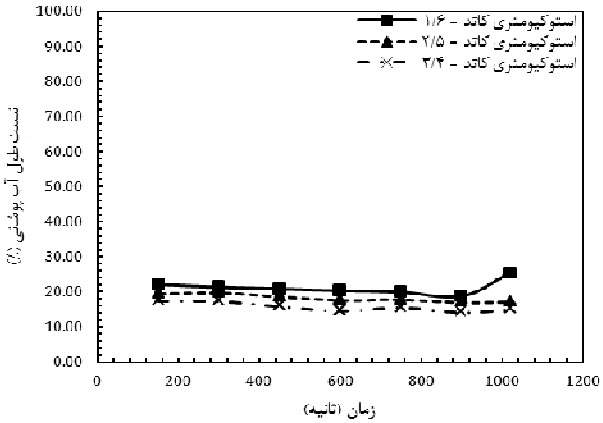
شکل ۹ نشان می‌دهد که در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت آند برابر ٪۰ (آند خشک) و افزایش رطوبت نسبی سمت کاتد، میزان نسبت طول آب‌پوشانی افزایش می‌یابد.



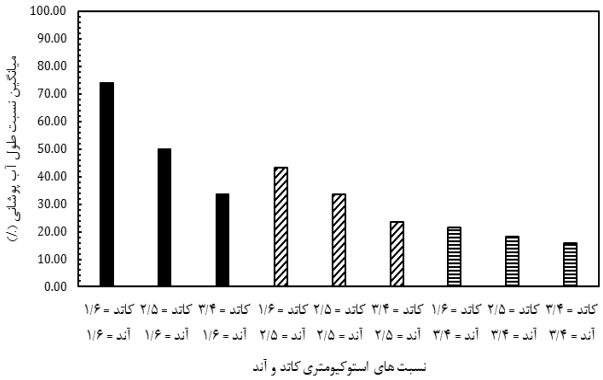
شکل ۷-الف نسبت طول آب‌پوشانی (استوکیومتری آند = ۱/۶)



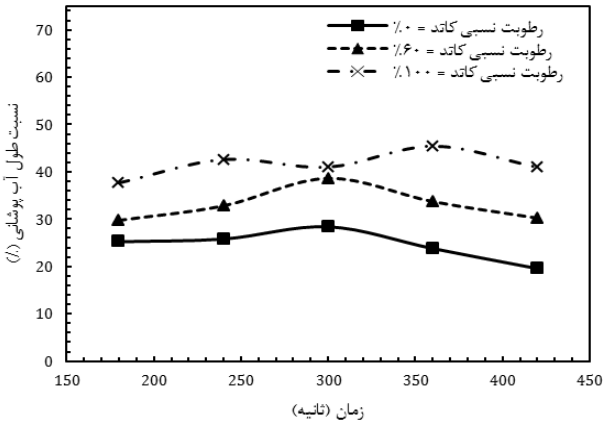
شکل ۷-ب نسبت طول آب‌پوشانی (استوکیومتری آند = ۲/۵)



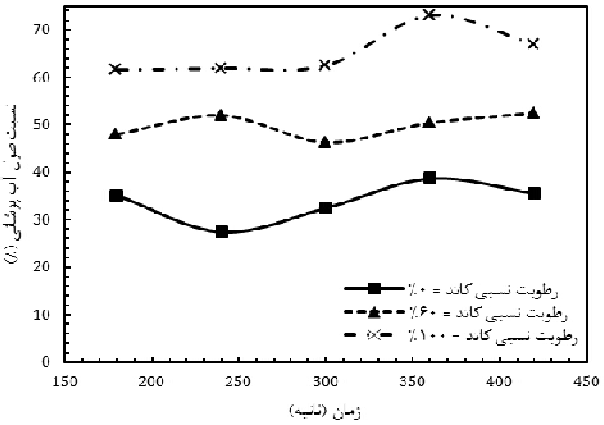
شکل ۷-ج نسبت طول آب‌پوشانی (استوکیومتری آند = ۳/۴)



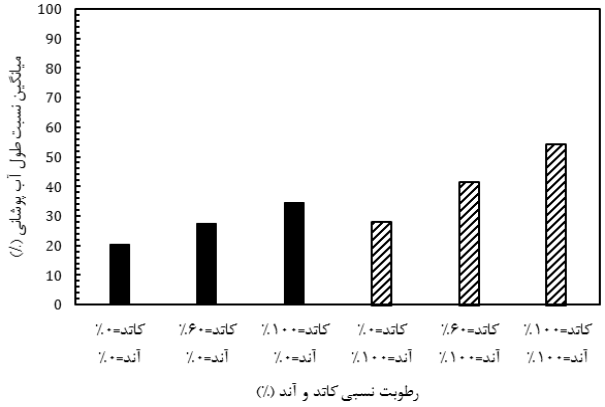
شکل ۸ میانگین نسبت طول آب‌پوشانی (براساس استوکیومتری آند)



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



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



شکل ۱۱ میانگین نسبت طول آب‌پوشانی (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 آب‌پوشانی 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 آب‌پوشانی 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 آب‌پوشانی 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 پیل‌سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در طول زمان (حالت نا پایا) در حالت آند کاملاً مرطوب (رطوبت نسبی آند = ٪۱۰۰، شکل ۱۰) بیشتر از حالت آند 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 آب‌پوشانی 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 پیل‌سوختی 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 آب‌پوشانی افزایش می‌یابد. این امر به‌دلیل 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

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

همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که با ثابت نگه‌داشتن رطوبت نسبی سمت کاتد و افزایش رطوبت نسبی آند از حالت ٪۰ (آند خشک) به ٪۱۰۰ (آند کاملاً مرطوب)، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی افزایش می‌یابد و شیب این افزایش میانگین نسبت طول آب‌پوشانی 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 آب‌پوشانی آزمایش‌های دمای گازهای ورودی آورده شده است. با بررسی شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که در تمامی زمان‌ها (در حالت نا پایا)، با افزایش دمای گازهای ورودی، نسبت طول آب‌پوشانی و در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده در کانال کاتد کاهش می‌یابد که به‌دلیل افزایش دمای گازهای ورودی می‌باشد، زیرا با افزایش دمای گازهای ورودی و با توجه به واکنش گرمازای 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 نا پایا)، افزایشی است و با افزایش دمای گازهای ورودی، نسبت طول آب‌پوشانی و در نتیجه میزان آب مایع انباشته شده با شیب کمتری افزایش می‌یابند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش دما، شیب افزایش نسبت طول آب‌پوشانی، 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 نا پایا)، کاهش می‌یابد.

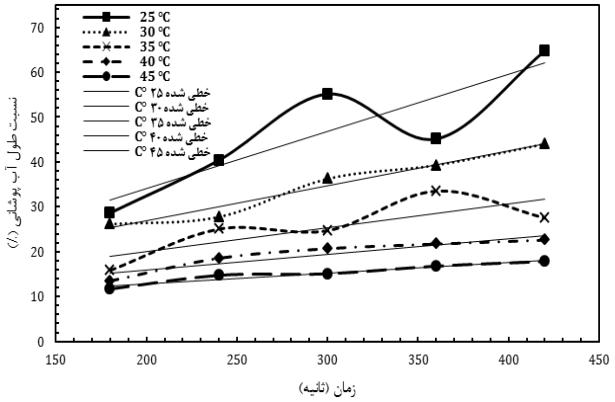
با بررسی شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش دمای گازهای ورودی، میانگین نسبت طول آب‌پوشانی، کاهش می‌یابد و به‌طور میانگین میزان آب مایع کمتری در کانال کاتد انباشته می‌شود. این امر با توجه به تأثیر افزایش دمای گازهای ورودی بر رطوبت نسبی گاز ورودی قابل توجیه است. با افزایش دمای گازهای ورودی، ظرفیت جذب آب در 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 آب‌پوشانی، کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر با افزایش دما، تأثیر دمای گازهای ورودی بر مدیریت آب کانال کاتد پیل‌سوختی غشا پلیمری تک مارپیچ در حالت میانگین زمانی، کاهش می‌یابد.

۵-۴- بررسی تکرارپذیری و صحت سنجی آزمایش‌ها

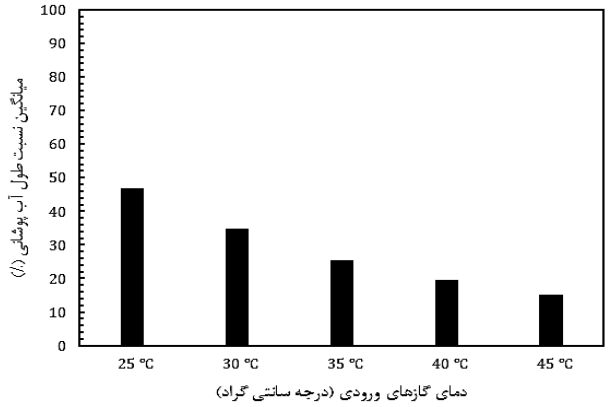
برای درنظر گرفتن خطای فردی و خطای آزمایش، تکرارپذیری هر کدام از آزمایش‌ها با انجام ۲ آزمایش در روزهای مختلف و توسط اپراتورهای متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که محل انباشت آب مایع و تشکیل قطرات آب، در آزمایش‌های سری اول و دوم متفاوت می‌باشد ولی مقادیر نسبت طول آب‌پوشانی مربوط به سری 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 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

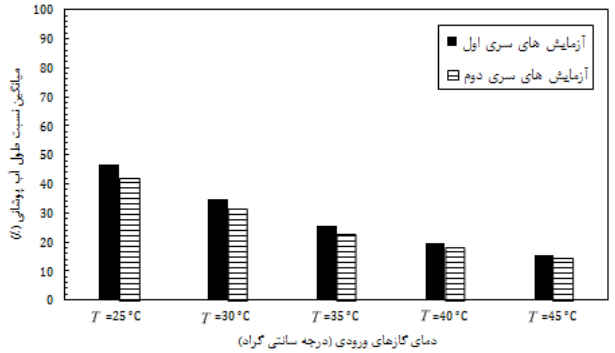
در شکل ۱۵، نمودار ولتاژ پیل در حالت ناپایا در شرایط استوکیومتری ۲/۵ در کاتد و استوکیومتری ۱/۶ در آند و رطوبت نسبی ٪۱۰۰ و دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد گازهای ورودی کاتد و آند انجام شده است. همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد، ولتاژ پیل نوسانات زیادی دارد که ناشی از طغیان گذرا در کانال می‌باشد؛ به عبارت دیگر، 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 بر طرف 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.



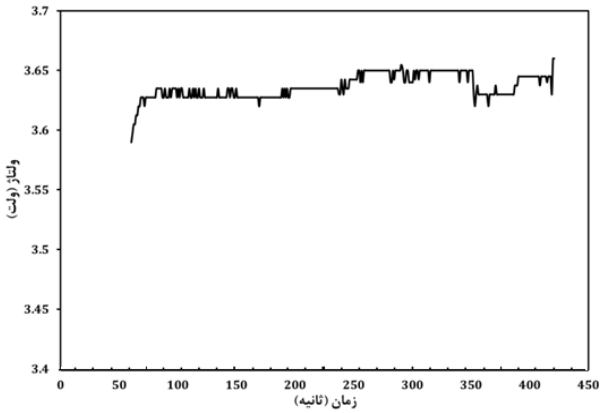
شکل ۱۲ نسبت طول آب‌پوشانی (آزمایش‌های دمای گازهای ورودی)



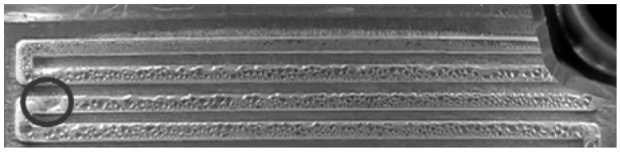
شکل ۱۳ میانگین نسبت طول آب‌پوشانی (آزمایش‌های دمای گازهای ورودی)



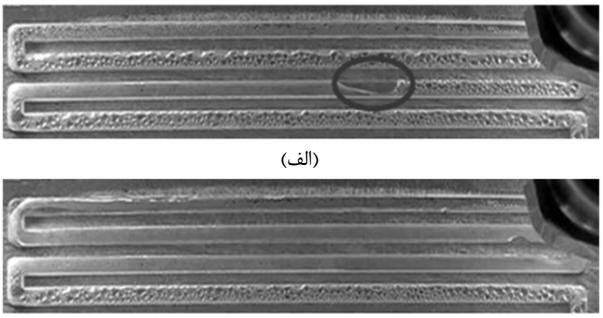
شکل ۱۴ بررسی تکرارپذیری نسبت طول آب‌پوشانی آزمایش‌های دمای گازها



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 به‌دلیل انسداد کانال به‌وسیله 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 به‌وسیله توده متحرک و جریان گاز، آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد، در نتیجه ب رطرف 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 پیل‌سوختی 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:

۱- با افزایش استوکیومتری کاتد و آند، میزان آب تجمع یافته در کانال سمت کاتد 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 پیل‌سوختی 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. Abouatallah, 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. Spernjak, 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. Pócza, 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.

[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. Spernjak, 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.

[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 Radiat*ion, 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, *Electrochemichal 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 Jersy:John Wiley & Sons, 2008.