



۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



## بررسی انتقال آب در لایه پخش گاز پیل سوختی غشا پلیمری

ابراهیم افشاری<sup>۱</sup>

تهران، پژوهشکده مهندسی جهاد، خیابان سولیران، کیلومتر ۱۶ جاده قدیم کرج

em\_afshari@yahoo.com

### چکیده

افزایش غلظت آب در لایه پخش گاز و تجاوز آن از غلظت اشباع می‌تواند بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری به شدت تاثیر بگذارد، زیرا در این حالت آب مایع در لایه پخش گاز تشکیل شده و با انباشته شدن آب، توانایی گازهای واکنشگر برای دستیابی به ناحیه واکنش را به شدت کاهش می‌دهد. در این مطالعه پدیده‌های انتقال در لایه پخش گاز کاتد پیل سوختی غشا پلیمری و تغییرات غلظت آب در این لایه بررسی می‌گردد. بدین منظور معادلات بقا جرم، ممنتوم، اجزا شیمیایی و پتانسیل الکتروشیمیایی به صورت کوپل، تک ناحیه‌ای، دو بعدی، تک فاز و به روش عددی حل شده‌اند و مقدار بخار آب موجود در لایه پخش گاز کاتد بررسی شده است. در پایان مدل با نتایج آزمایشگاهی موجود در مراجع مقایسه و نشان داده شده که نتایج شبیه‌سازی سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی PEM، لایه پخش گاز، انتقال آب مدل‌سازی عددی

### ۱- مقدمه

غشا به عنوان هادی پروتون در پیل سوختی غشا پلیمری بکار می‌رود که در دو طرف غشا، الکترودها برای هدایت گازهای واکنشگر به لایه‌های کاتالیست که در فصل مشترک الکترودها/غشا قرار دارند، به صورت متخلخل ساخته می‌شوند و به همین دلیل به عنوان لایه‌های پخش گاز نیز شناخته می‌شوند. لایه کاتالیست بر اساس فرایند تولید می‌تواند بخشی از لایه‌های پخش گاز متخلخل یا بخشی از غشا باشد. مجموعه لایه‌های پخش گاز و لایه‌های کاتالیست در دو طرف آند و کاتد به همراه غشا، مجموعه الکترودها - غشا نامیده می‌شود. مجموعه الکترودها - غشا بین صفحات جمع کننده قرار می‌گیرد. کانال‌های جریان که گازهای واکنشگر را به پیل هدایت می‌کنند در داخل این صفحات ساخته می‌شوند [۱].

هوای مرطوب وارد کانال کاتد و گاز هیدروژن وارد کانال آند می‌شود. پخش هیدروژن از میان لایه پخش گاز آند به طرف لایه کاتالیست انجام می‌شود. در لایه کاتالیست آند، مولکول‌های هیدروژن به دو یون هیدروژن و دو الکترون تبدیل می‌شوند. پروتون‌ها از میان غشاء به طرف لایه کاتالیست کاتد حرکت کرده و الکترون‌ها نیز از طریق مدار خارجی به سمت کاتد منتقل می‌شوند و یک جریان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید که باعث تولید کار الکتریکی می‌شود. در طرف کاتد، اکسیژن از میان لایه پخش گاز کاتد به طرف سطح کاتالیست منتقل شده و با پروتون‌ها و الکترون‌ها واکنش داده و آب تشکیل می‌شود. تصویری از انتقال آب در نواحی مختلف پیل سوختی غشا پلیمری به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. موقعی که یک پتانسیل الکتریکی در پیل ایجاد می‌شود، آب توسط درگ الکترو - اسمزیک آند را ترک می‌کند، اما پخش

۱- دکتری مکانیک - پژوهشگر



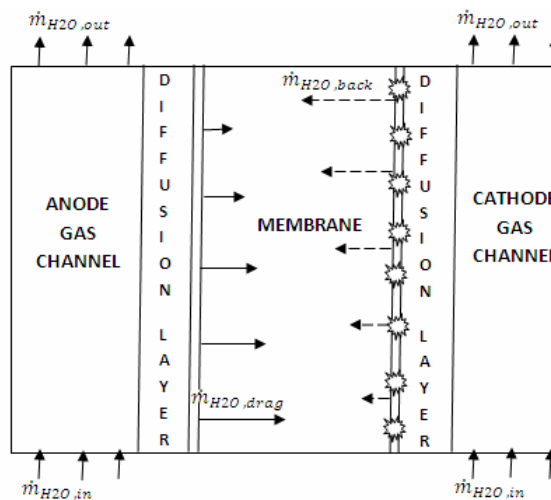
۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران

$H_2 + O_2$   
3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



برگشتی ناشی از گرادیان غلظت در اثر تولید آب از کاتد به آند اتفاق می‌افتد. کاهش آب در سمت آند غشا که توسط درگ الکترو - اسمزیک ایجاد می‌شود، در دانسیته جریان‌های بالا و در ابتدای کانال بالا می‌باشد، اما پخش برگشتی آب معمولاً در طول کانال همان طور که در این شکل نشان داده شده است، افزایش می‌یابد. این امر به دلیل تولید آب در لایه کاتالیست کاتد و انتقال آب تولیدی به سمت انتهای کانال به سبب حرکت گازهای واکنشگر می‌باشد [۲].



شکل ۱- دیاگرام شماتیکی از مکانیسم‌های انتقال آب در نواحی پیل سوختی غشا پلیمری [۲]

پروفیل‌های غلظت آب در سمت آند و کاتد در طول کانال در شکل (۲) نشان داده شده است. مشخصه جالب این منحنی محلی است که شار آب در غشا صفر است و از این رو نقطه مینیمم پروفیل غلظت آب در سمت آند اتفاق می‌افتد. شروع شناوری کاتد در جایی است که بخار آب اشباع می‌شود و تعادل فعالیت آب بین آند و کاتد در خروجی‌های پیل اتفاق می‌افتد. مطابق شکل (۲)، غلظت آب در فصل مشترک آند/غشا در طول کانال کاهش می‌یابد و به نقطه مینیمم می‌رسد که در این نقطه شار خالص آب عبوری از غشا صفر است. در این نقطه درگ الکترو - اسمزیک و پخش برگشتی از کاتد به آند با هم بالانس می‌شوند. بعد از این نقطه، غلظت آب در سمت آند افزایش می‌یابد. اگر پخش برگشتی از کاتد به آند به اندازه‌ای نباشد که بر درگ الکترو - اسمزیک غلبه کند، آند می‌تواند کاملاً دهیدراته شود. این موقعیت بحرانی (نقطه مینیمم غلظت آب در سمت آند) بر بالا بودن مقاومت غشا تاثیرگذار است.

در دانسیته جریان‌هایی بزرگ‌تر از یک مقدار مشخص، در سمت کاتد بخار آب به حالت اشباع می‌رسد و تغییر فاز اتفاق می‌افتد. آب مایع تولید شده بخشی از تخلخل‌های لایه پخش گاز را بسته و شناوری پیش می‌آید. به صورت تئوری، آب مایع در نقطه شناوری،  $\gamma_{fl}$ ، مطابق شکل (۲)، آشکار می‌شود.

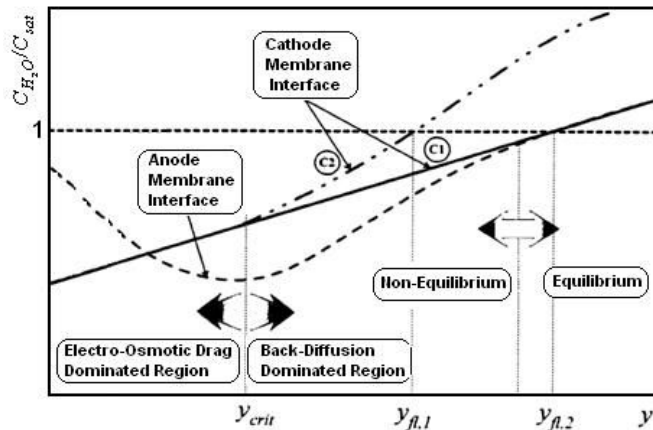


۷ و ۷ آبان ۱۳۸۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار پیل سوختی ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



شکل ۲- شماتیکی از پروفیل‌های غلظت آب در طول کانال در سمت آند و کاتد غشا، رژیم‌های مختلف انتقال آب

موقعی که یک غشا نازک در پیل سوختی استفاده شود، تبادل آب بین آند و کاتد بسیار آسان‌تر است و بنابراین غلظت آب در هر دو سمت آند و کاتد غشا به سمت خروجی کانال به یکدیگر نزدیک می‌شوند که این یک وضعیت تعادل نامیده می‌شود. این روند به وسیله منحنی C1 در شکل (۲) نشان داده شده است. این شرط تعادل فقط موقعی است که پخش برگشتی آب از کاتد به آند تا حد زیادی نسبت به درگ الکترو - اسمزیک بزرگ‌تر باشد. اما اگر غشا به اندازه‌ای ضخیم باشد که پخش برگشتی آب نتواند بر درگ الکترو - اسمزیک غلبه کند، اختلاف غلظت آب بین آند و کاتد به علت تولید آب در سمت کاتد، زیاد می‌شود. این پدیده به وسیله منحنی C2 در شکل (۲) نشان داده شده است.

در سال‌های اخیر برای فهم بهتر انتقال آب و تاثیر آن بر طراحی و بهینه کردن عملکرد نواحی مختلف پیل، شبیه‌سازی عددی مورد توجه خاص قرار گرفته است. پاروچ و همکاران [۳] به بررسی تاثیر ضرایب انتقال موثر لایه پخش گاز بر عملکرد پیل سوختی پرداختند. مدل آنها تک فاز بوده و تاثیر تغییر فاز آب در نظر گرفته نشده است. در تحقیق سیگل و همکارانش [۴] نیز لایه پخش گاز بررسی شده است، اما به دلیل استفاده از مدل تک ناحیه‌ای و مدل کردن دیگر نواحی پیل سوختی زمان محاسبات بالا می‌باشد. سیورسن و جلالی [۵] با در نظر گرفتن لایه کاتالیست به عنوان فصل مشترک بین غشا و لایه پخش گاز، به بررسی لایه پخش گاز پرداختند. در این مدل به جای استفاده از شرایط مرزی بین لایه پخش گاز و لایه کاتالیست از شرایط مرزی بین لایه پخش گاز و غشا استفاده می‌شود. یکی از مهمترین جنبه‌های عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری مدیریت آب، یعنی بررسی چگونگی انتقال است که در کار اسپرینگر و همکارانش [۶] بررسی شده است. کار آنها شامل دو بخش توسعه یک مدل محاسباتی از لایه پخش گاز و غشا و بخش دوم شامل داده‌های تجربی برای روابط انتقال آب از میان نافین بود. در این مدل‌سازی لایه کاتالیست به عنوان فصل مشترک عمل می‌کند و آب انتقالی به وسیله درگ الکترو-اسمزیک محاسبه شده است. با ترکیب داده‌های تجربی و مدل محاسباتی، اسپرینگر و همکارانش منحنی عملکرد پیل در محدوده شرایط عملکرد را بدست آوردند. آنها همچنین از مدل‌سازی استفاده کردند تا مقدار آب انتقالی در طول سل از آند به کاتد را بدست آورند. این مقدار آب انتقالی، با آب انتقالی محاسبه شده توسط درگ الکترو - اسمزیک متفاوت بود، بنابراین نتیجه گرفتند که آب برگشتی از کاتد به آند نیز مهم می‌باشد. وانگ و وانگ [۷] مدلی از لایه پخش گاز که شامل انتقال آب است را ارائه دادند. آنها نتایجی برای پرفیل‌های اشباع داخل لایه پخش گاز، کانتورهای سرعت برای فاز گاز و فاز مایع و منحنی عملکرد پیل را ارائه دادند. ناتارجان و ون [۸] نیز در توسعه کارهای قبلی یک مدل دو بعدی برای انتقال آب در لایه پخش گاز ارائه دادند و این کار شامل مطالعه پارامتری و نشان دهنده تاثیرات استوکیومتری، رطوبت نسبی و دمای سل روی عملکرد پیل می‌باشد. رو و لی [۹] و [۱۰] نیز مدل‌سازی یک بعدی پیل سوختی PEM را انجام دادند و با بررسی پروسه‌های مختلف انتقال داخل پیل، تاثیر آنها بر

عملکرد پیل را بررسی کردند. آنها از شرایط مرزی دلخواه و غیر دقیق استفاده کردند. همچنین در ادامه کار، آنها مدلسازی پیل سوختی همراه با تاثیرات منوکسید کربن را نیز بررسی کردند. در این مقاله انتقال و تغییرات غلظت آب در لایه پخش گاز کاند پیل سوختی غشا پلیمری به کمک یک مدل دو بعدی، تک ناحیه‌ای، دما ثابت، تک فاز و به روش عددی بررسی شده است که بدین منظور معادلات بقا جرم، ممنتم، اجزا شیمیایی و پتانسیل الکتروشیمیایی به صورت کوپل حل شده و انتقال آب تجزیه و تحلیل شده است.

## ۲- فرضیات

به دلیل پیچیدگی جریان دو فازی، در این مقاله جریان تک فاز در پیل سوختی بررسی می‌شود. با بررسی جریان تک فاز پدیده‌های انتقال در پیل بهتر تحلیل می‌گردد، زیرا درگیر پیچیدگی‌های جریان دو فازی نمی‌شویم. دیگر فرضیات شامل: مخلوط گازهای واکنشگر گاز کامل هستند؛ جریان داخل کانال‌ها دائم، آرام و تراکم ناپذیر می‌باشد؛ لایه‌های پخش گاز، لایه‌های کاتالیست و غشا یکنواخت و همگن هستند؛ از تاثیرات تشعشع، سورت و دوفور صرف نظر می‌شود؛ از تاثیر گرانش صرف نظر می‌شود؛ از مقاومت تماسی بین لایه‌ها صرف نظر می‌شود؛ ساختار لایه کاتالیست، توده انباشته می‌باشد؛ غشا در مقابل گازهای واکنشگرها نفوذناپذیر است و پتانسیل مدار باز مرجع در کاتد تابعی از دما و در آند صفر است.

## ۳- معادلات حاکم

بر اساس فرضیات بیان شده در بخش ۴-۵، معادلات حاکم بر پیل سوختی غشا پلیمری شامل معادلات بقا جرم، ممنتم، اجزا شیمیایی و شارژ الکتریکی می‌باشد که این معادلات در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. ترم‌های چشمه در این معادلات و همچنین خواص الکتروشیمیایی و فیزیکی مورد نیاز برای حل این معادلات نیز در جدول‌های (۲)، (۳) و (۴) آمده است.

جدول ۱- معادلات حاکم

معادله	شکل برداری معادله	شماره معادله
پیوستگی	$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0$	(۱)
ممنتم	$\frac{1}{\epsilon^2} \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_{Dar}$	(۲)
اجزا	$\nabla \cdot (\bar{u} C_k) = \nabla \cdot (D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k = 0$	(۳)
پتانسیل	$\nabla \cdot (\sigma_e^{eff} \nabla \phi_e) + S_e = 0$	(۴)

جدول ۲- ترم‌های چشمه

معادله	ناحیه حاکم		
	لایه‌های پخش گاز	لایه‌های کاتالیست	غشا
ممنتم	$-\frac{\mu}{K} \bar{u}$	$-\frac{\mu}{K} \bar{u}$	$-\frac{\mu}{K} \bar{u}$
اجزاء	$-\nabla \cdot \left( \frac{n_d}{F} I \right) - \frac{s_k j}{nF}$	$-\nabla \cdot \left( \frac{n_d}{F} I \right) - \frac{s_k j}{nF}$	$-\nabla \cdot \left( \frac{n_d}{F} I \right) - \frac{s_k j}{nF}$
پتانسیل	0	j	0

جدول ۳- خواص فیزیکی

پارامتر	مقدار
فعالیت بخار آب	$a = \frac{C_g^{H_2O} RT}{P_{sat}}$
ضریب هدایت یونی	$\kappa_m = (0.0005139\lambda - 0.000326) \exp(1268.0(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}))$
محتوی آب غشا	$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 + 36.0a^3 & \text{for } 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & \text{for } 1 < a \leq 3 \end{cases}$
ضریب درگ الکترو اسمزیک	$n_d = \begin{cases} 1.0 & \text{for } \lambda \leq 14 \\ 1.5/8(\lambda - 14) + 1.0 & \text{otherwise} \end{cases}$
ضریب پخش آب مایع	$D_m^{H_2O} = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (e^{0.28\lambda} - 1) e^{(-2346/T)} & \text{for } 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) e^{(-2346/T)} & \text{otherwise} \end{cases}$
ضریب پخش گاز در محیط متخلخل	$D_k = \epsilon_i^{1.5} D_0 (\frac{T}{T_0})^{1.5} (\frac{P}{P_0})$
فشار بخار آب	$\log_{10} p_{sat} = -2.1749 + 0.02953(T - 273.15) - 9.1837 \times 10^{-5}(T - 273.15)^2 + 1.445 \times 10^{-7}(T - 273.15)^3$

جدول ۴- خواص الکتروشیمیایی

پارامتر	آند	کاتد
دانسیتته جریان انتقال	$j = (ai_0)_a (\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}})^{1/2} (\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F\eta)$	$j = -(ai_0)_c (\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}}) \exp(-\frac{\alpha_c}{RT} F\eta)$
پتانسیل فعال سازی	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_o \quad (\phi_s = 0)$	$\eta = \phi_s - \phi_e - U_o \quad (\phi_s = V_{cell})$
ولتاژ مدار باز	$U_o = 0$	$U_o = 1.23 - 0.9 \times 10^{-3}(T - 298.15)$
دانسیتته جریان تبادل در مساحت سطح فعال	$(ai_0)_a = 1.0 \times 10^9$	$(ai_0)_c = 2.0 \times 10^4$
ضریب انتقال	$\alpha_a + \alpha_c = 2$	$\alpha_c = 1$

از آنجا که پتانسیل فاز الکترولیت،  $\phi_e$  و هدایت پروتونی غشا  $\kappa$  با استفاده از دانسیته جریان موضعی  $I$  به دست می آید، دانسیته جریان متوسط با انتگرال گیری از دانسیته جریان موضعی روی غشا به دست می آید.

$$I = -\kappa^{eff} \nabla \phi_e \quad (5)$$

$$I_{ave} = \frac{1}{A_m} \int_{A_m} I dA \quad (6)$$

۴- شرایط مرزی

روابط (۱) تا (۴) یک دستگاه معادلات حاکم را برای حل  $\phi_e$ ،  $C_i$ ،  $p$ ،  $v$ ،  $u$  مجهول  $\delta$  تشکیل می دهند (  $C_i$  غلظت اکسیژن، هیدروژن، آب و نیتروژن می باشد). برای حل این معادلات نیاز به مشخص کردن شرایط مرزی مناسب می باشد. چون در این مدل از روش تک ناحیه ای استفاده شده است، فقط شرایط مرزی بیرونی باید مشخص شود و نیازی به شرایط مرزی بین لایه های مختلف پیل سوختی نمی باشد. سرعت ورودی آند و کاتد می تواند با استفاده از نسبت استوکیومتری تعیین شود که

نسبت استوکیومتریکی به صورت نسبت مقدار واکنشگرهای تامین شده برای پیل به واکنشگرهای مورد نیاز برای واکنش الکتروشیمیایی که دانسیته جریان مبناء را تولید کند، تعریف می‌شود.

$$\zeta_a = C_{in}^{H_2} U_{a,in} \frac{2F}{I_{ref}} \frac{A_{a,in}}{A_{react}} \quad (7)$$

$$\zeta_c = C_{in}^{O_2} U_{c,in} \frac{4F}{I_{ref}} \frac{A_{c,in}}{A_{react}} \quad (8)$$

جریان در مرزهای خروجی به صورت توسعه یافته یا شار صفر با فشار برگشتی در نظر گرفته شده است. بر روی دیوارها شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط شار صفر برای دیگر متغیرها به کار می‌رود.

## ۵- روش حل عددی

معادلات حاکم بر پیل سوختی همراه با شرایط مرزی مشخص شده با روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از یک کد کامپیوتری که به زبان فرترن نوشته شده است، حل شده‌اند. در این کد، میدان‌های سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل به‌دست آمده‌اند [۱۱]. برای حل مجموعه معادلات از یک روند تکراری استفاده شده است و حل تا رسیدن به همگرایی با دقت  $10^{-6}$  ادامه پیدا کرده است. مهمترین علت انتخاب روند تکرار برای حل معادلات، کوپل بودن آنها می‌باشد. معادلات بقا در پیل سوختی غشا پلیمری به دو دلیل به‌شدت با یکدیگر کوپل می‌باشند.

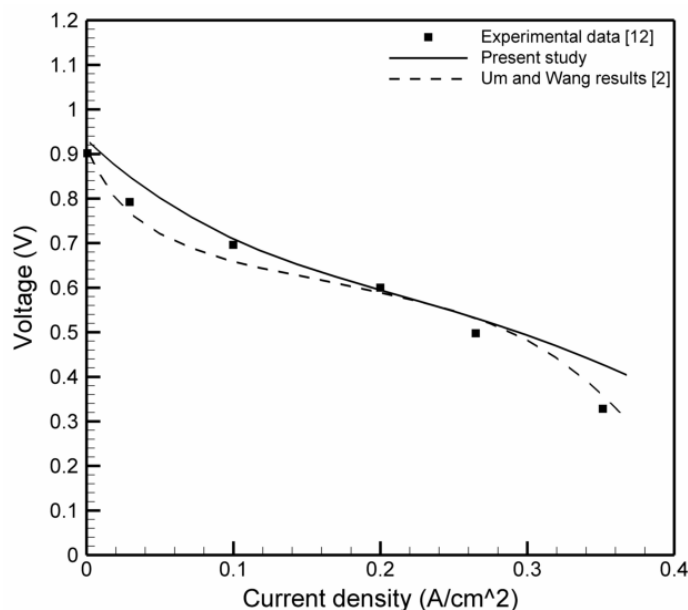
۱. خواص فیزیکی و شیمیایی مواد متغیر بوده و تابع پارامترهای انتقال (مانند دما و غلظت) می‌باشد. به عنوان مثال هدایت یونی تابع دما و غلظت، ضریب نفوذ تابع دما و فشار، ظرفیت آب غشا تابع غلظت، ویسکوزیته تابع دما و ضریب درگ الکترو - اسمزیک تابع غلظت می‌باشد.

۲. معادلات بقا از طریق معادله باتلر - ولمر با یکدیگر کوپل هستند. به عنوان مثال معادله باتلر - ولمر تابع غلظت بوده و در معادله بقا اجزا که غلظت‌ها را محاسبه می‌کند، معادله باتلر - ولمر به عنوان بخشی از ترم چشمه وارد معادله می‌شود. به منظور شبکه‌بندی مدل، از یک شبکه مستطیلی با ۲۵۰ گره در راستای x و تعداد ۵۰، ۳۰، ۱۰ و ۶۰ گره در هر کدام از نواحی کانال، لایه پخش گاز، لایه کاتالیست و لایه غشا استفاده شده است. تعداد گره‌ها طوری تنظیم شده که نتایج مدل عددی مستقل از تعداد شبکه شود. شبکه مذکور در راستای طولی یکنواخت ولی در راستای ضخامت به دلیل ضخامت بسیار کم لایه‌های الکترولیت، کاتالیست و لایه پخش گاز، غیر یکنواخت است.

## ۶- نتایج

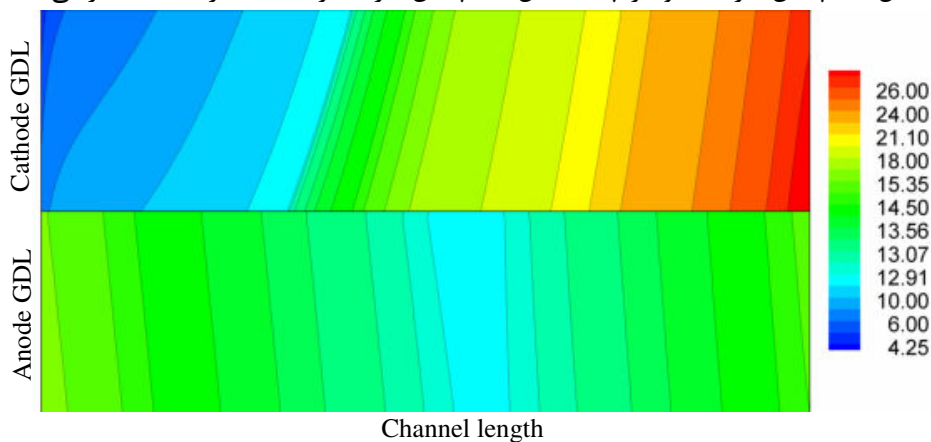
برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، منحنی عملکرد پیل سوختی با نتایج آزمایشگاهی [۱۲] و نتایج عددی مرجع [۲] مقایسه شده است. شرایط مدل‌سازی مشابه شرایط مدل آزمایشگاهی است، به طوری که سوخت و هوای خشک با دمای ۵۰ درجه سلسیوس وارد پیل می‌شود. مطابق شکل (۳) توافق خوبی بین نتایج به‌دست آمده از مدل حاضر و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. علت این اختلاف ناشی از دو بعدی و تک فاز بودن مدل حاضر است که محدودیت انتقال جرم در زیر صفحات جمع‌کننده و تاثیرات تغییر فاز را مدل نمی‌کند. در دانسیته جریان‌های بالا، مدل به نتایج عددی مرجع [۲] نزدیک می‌باشد، زیرا مدل ارائه شده در مرجع [۲] نیز تک فاز، اما سه بعدی می‌باشد.

از آنجایی که پارامترهای عمده‌ای از قبیل تغییر غلظت، دما و شار آب بر پتانسیل پیل تاثیر می‌گذارند و پتانسیل پیل با نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که این پارامترها نیز دقیق مدل شده‌اند. این نکته مهم قابل ذکر لازم است که به دلیل یک محیط کاملاً واکنشگر، بسیاری از این پارامترها به روش آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری نیستند.



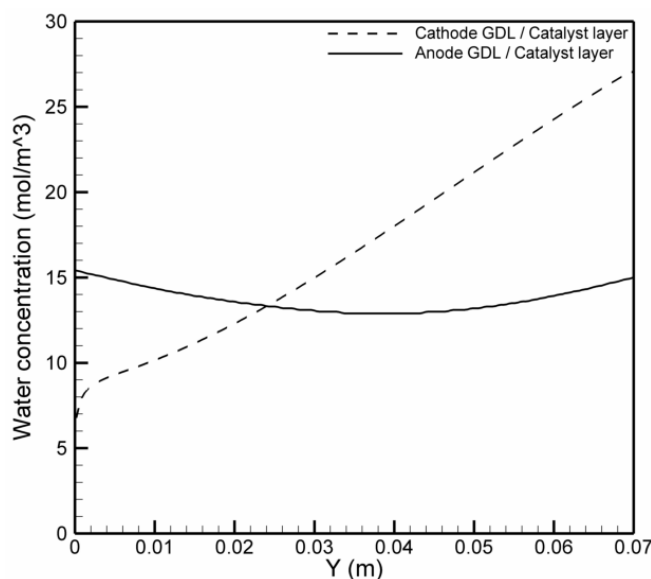
شکل ۳- مقایسه منحنی پلاریزاسیون محاسبه شده با نتایج آزمایشگاهی [۱۲] و نتایج عددی مرجع [۲]

توزیع غلظت آب در لایه‌های پخش گاز آند و کاتد، در حالتی که هیدروژن ورودی به کانال آند کاملاً مرطوب و درصد رطوبت اکسیژن ورودی پایین است، در شکل (۴) نشان داده شده است. در جهت طول کانال، آب از ابتدا تا حدود وسط به دلیل بالاتر بودن غلظت آب در سمت آند و درگ الکترو-اسمزیک، از سمت آند به کاتد منتقل می‌شود. از حدود وسط تا انتهای کانال، به دلیل تولید آب ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی در لایه کاتالیست کاتد، غلظت آب در سمت کاتد افزایش و پخش برگشتی از کاتد به آند پیش می‌آید. این امر باعث می‌شود غلظت آب در سمت آند از وسط تا انتهای آن افزایش یابد. غلظت آب در کاتد نیز به دلیل تولید آب در طول کانال افزایش می‌یابد. به دلیل کاهش دانسیته جریان در طول کانال، نرخ تولید آب در طول کانال کاهش می‌یابد، اما در اثر انتقال آب ناشی از جریان گاز (ترم جابجایی) غلظت آب در پایین دست جریان بالاتر است. جریان گاز باعث خارج شدن آب از پیل سوختی می‌شود. در نواحی متخلخل به علت پایین بودن سرعت، انتقال آب عمدتاً ناشی از پخش می‌باشد که تغییر شیب خطوط غلظت ثابت در شکل (۴) ناشی از این امر می‌باشد. تغییر شیب خطوط غلظت ثابت، وابسته به ابعاد متخلخل لایه پخش گاز است و هر چه متخلخل لایه پخش گاز کمتر باشد تغییر شیب بیشتر می‌باشد.



شکل ۴- توزیع غلظت بخار آب در لایه‌های پخش گاز آند و کاتد، آند کاملاً مرطوب و رطوبت نسبی کاتد پایین و برابر ۲۵٪

شکل (۵) نیز توزیع غلظت بخار آب در کانال و لایه پخش گاز کاتد را در جهت محوری در چندین مقطع پیل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، در سمت کاتد همواره غلظت بخار آب افزایش می‌یابد. در ابتدای کانال به علت بزرگ بودن دانسیته جریان موضعی، درگ الکترو - اسمزیک و نرخ تولید آب ناشی از واکنش الکتروشیمیایی کاتدی بالا بوده و در نتیجه غلظت آب ورودی افزایش می‌یابد. با حرکت در طول کانال هر چند درگ الکترو - اسمزیک و نرخ آب تولیدی کاهش می‌یابد اما چون آب در فاز بخار می‌باشد، به علت حرکت کلی سیال، بخار آب به سمت پایین دست منتقل می‌شود و غلظت بخار در پایین دست افزایش می‌یابد.



شکل ۵- توزیع غلظت بخار آب در جهت محوری، در فصل مشترک لایه‌های مختلف پیل

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل عددی دو بعدی، دما ثابت، تک ناحیه‌ای و تک فاز پیل سوختی غشا پلیمری به منظور بررسی انتقال آب توسعه داده شده و بررسی شد. در وضعیتی که هیدروژن ورودی به کانال آند کاملاً مرطوب و درصد رطوبت اکسیژن ورودی پایین است، آب از ابتدا تا حدود وسط کانال از سمت آند به کاتد منتقل می‌شود. از حدود وسط کانال تا انتهای کانال، غلظت آب در سمت کاتد افزایش و پخش برگشتی از کاتد به آند رخ می‌دهد. غلظت آب در کاتد نیز به دلیل تولید آب در طول کانال افزایش می‌یابد. انتقال آب در لایه پخش گاز به شدت بر انتقال گازهای واکنشگر از کانال‌ها به سمت لایه‌های کاتالیست تاثیر می‌گذارد.

## مراجع

- 1- Afshari, E., Jazayeri, S.A., Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell(2009). J. Power Sources, 194, 423-432.
- 2- Um, S., Wang, C. Y., Computational study of water transport in proton exchange membrane fuel cell(2006). J. Power Sources, 156, 211-223.
- 3- Pharoah, J.G., Karan, K., Sauna, W., On effective transport coefficients in PEM fuel cell electrodes: Anisotropy of the porous transport layers(2006). J. Power Sources, 161, 214-224.
- 4- Siegel, N.P., Ellis, M.W., Nelson, D.J., Spakovsky, M.R., A two-dimensional computational model of a PEM fuel cell with liquid water transport(2004). J. Power Sources, 128, 173-184.





۱۳۸۸ آبان ۷ و ۸  
October 28 & 29, 2009

سومین سمینار بین‌المللی سوخت‌ها ایران



3<sup>rd</sup> Fuel Cell Seminar of Iran



- 5- Sivertsen, B.R., Djilali, N., CFD-Based Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells(2005). J. Power Sources, 141, 65-78.
- 6- Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., Gottesfeld, S., Polymer Electrolyte Fuel Cell Model(1991). J. Electrochem. Soc., 138(8), 2334-2341.
- 7- Wang, Z.H., Wang, C.Y., Two-Phase Flow and Transport in the Interdigitated Air Cathode of Proton Exchange Membrane Fuel Cells(2000). Proceedings ASME Heat Transfer Division, HTD-Vol.366-1, 27-33.
- 8- Natarajan, D., Van Nguyen, T., A Two-Dimensional, Two-Phase, Multicomponent, Transient Model of the Cathode of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Conventional Gas Distributors(2001) J. Electrochem. Soc.,148(12), A1324-A1335.
- 9- Rowe, A., Li, X., Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells(2001). J. Power Sources, 102, 82-96.
- 10- Baschuk, J., Rowe, A., Li, X., Modeling and Simulation of PEM Fuel Cells CO Poisoning(2003). J. Energy Resources Technology, 125, 94-100.
- 11- Patankar S. V., Numerical heat transfer and fluid flow(1980). PA: McGraw Hill.
- 12- Buchi, F. N., Srinivasan, S., Operating proton exchange membrane fuel cells without external humidification of the reactant gases(1997), J. Electrochemical Society, 144, 2767–2773.