

بررسی تاثیر مانع در کانال کاتد بر توزیع دمای پیل سوختی غشا پلیمری

علیرضا اسدی راد

ابراهیم افشاری*

نبی جهانتيغ*

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، alirezaasadirad@yahoo.com

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، e.afshari@eng.ui.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران، njahantigh93@gmail.com

چکیده

مدیریت گرما در پیل سوختی غشا پلیمری برای افزایش نرخ واکنش‌ها، جلوگیری از تشکیل نقاط داغ، جلوگیری از خشک‌شدگی غشا ضروری است. در پیل سوختی غشا پلیمری با محدودیت در جهت‌های افزایش و کاهش دما مواجه می‌باشیم. میدان جریان بر انتقال جرم و گرما و به طبع آن بر چگالی جریان تاثیر می‌گذارد و طراحی مناسب میدان منجر به بهبود عملکرد پیل می‌شود. کانال‌های جریان موازی همراه با مانع می‌توانند انتقال واکنش دهنده‌ها به لایه کاتالیست را افزایش داده و باعث کاهش بیشینه دما، توزیع یکنواخت دما و بهبود عملکرد پیل شوند. در این مقاله به مدل‌سازی عددی، سه بعدی و دوفازی پیل با کانال‌های همراه با مانع پرداخته شده و عملکرد الکتروشیمیایی و گرمایی آن با پیل با کانال‌های موازی ساده مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزودن مانع باعث بهبود انتقال جرم از کانال‌ها به سمت لایه پخش گاز شده و از این رو نرخ واکنش در پیل افزایش یافته و منجر به بهبود عملکرد پیل می‌شوند. همچنین وجود مانع باعث می‌شود بیشینه دمای پیل بیشتر از ۱ کلوین کاهش یابد و توزیع دما یکنواخت‌تر شود. **واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی غشا پلیمری، میدان جریان، مانع، دما، انتقال اکسیژن، افت فشار.

Investigating the effect of the baffles in the cathode channel on the temperature distribution of the polymer membrane fuel cell

A. R. Asadi Rad

E. Afshari

N. Jahantigh

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

Abstract

Heat management in the polymer membrane fuel cell is necessary to increase the rate of reactions, prevent the formation of hot spots, and prevent the membrane from drying out. In the polymer membrane fuel cell, in the polymer membrane fuel cell, there is a limitation in increasing and decreasing the temperature. The flow field affects the mass and heat transfer and consequently the current density, and the proper design of the flow field leads to the improvement of the fuel cell performance. Parallel flow channels with baffles can increase the transfer of reactants to the catalyst layer and reduces the maximum temperature, uniform temperature distribution and improve battery performance. In this article, the numerical, three-dimensional and two-phase modeling of the fuel cell with channels along with baffles is discussed and its electrochemical and thermal performance is compared with the battery with simple parallel channels. The results show that the addition of the baffles improves the mass transfer from the channels to the gas diffusion layer and hence the reaction rate in the cell increases and leads to improved cell performance. Also, the presence of the baffles causes the maximum temperature of the fuel cell to decrease by more than 1 Kelvin and the temperature distribution becomes more uniform.

Keyword: Polymer membrane fuel cell, flow field, baffles, temperature, oxygen transport, pressure drop.

۱- مقدمه

بین رفتن غشا رخ دهد. علاوه بر این توزیع نایکنواخت گازهای واکنشگر و دما باعث شده در بعضی نقاط نرخ واکنش بالا رفته و به تبع آن نقاط داغ تشکیل شود. تشکیل نقاط داغ باعث پارگی و گسیختگی غشا شده و عملکرد پیل را مختل می‌کند. میدان جریان پیل سوختی علاوه بر پخش مناسب گازهای واکنشگر باید به شکلی طراحی شود که افت فشار ایجاد شده به اندازه‌ای باشد که توانایی خارج‌سازی آب داخل پیل سوختی را داشته باشد. افت فشار زیاد نیز منجر به افزایش توان پارازیتی سیستم پیل سوختی می‌شود [۱، ۲]. از این‌رو طراحی میدان جریان در داخل صفحات دو قطبی به منظور مدیریت آب و گرما پیل سوختی غشا پلیمری بسیار مهم است. میدان‌های جریان متداول شامل موازی، بند انگشتی، مارپیچی و پینی است [۳، ۴]. میدان جریان موازی معمولی دارای مزایای سادگی ساخت و افت فشار کم است. با این حال،

صفحات دو قطبی وظیفه عبور جریان الکتریکی، پشتیبانی ساختاری و انتقال گرما از داخل پیل سوختی غشا پلیمری به بیرون را بر عهده دارند. کانال‌های جریان داخل این صفحات ماشین‌کاری شده وظیفه انتقال گازهای واکنشگر به داخل پیل و انتقال محصولات از پیل به بیرون را دارند. توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر و همچنین توزیع یکنواخت دما در پیل سوختی غشا پلیمری بسیار اهمیت دارد و به منظور بهبود عملکرد پیل، کانال‌های جریان باید طوری طراحی شوند که تا حد ممکن به این اهداف برسند [۱]. توزیع غیریکنواخت گازهای واکنشگر و دما باعث می‌شود در بعضی نقاط میدان جریان پدیده غرق‌شدگی غشا و لایه پخش گاز و در مقابل در بعضی نقاط کم‌آبی و از

کانال جریان در این میدان و همچنین بعضی از انواع کانال‌های مارپیچی در برابر تجمع آب مایع و انسداد، آسیب‌پذیر هستند که این امر بر توزیع واکنش‌دهنده‌ها در کانال جریان تأثیر می‌گذارد و توزیع گاز غیر یکنواخت را نتیجه می‌دهد. در میدان جریان مارپیچی واکنش‌دهنده‌ها به طور یکنواخت‌تری توزیع می‌شوند؛ اما افت فشار بیشتری نسبت به کانال‌های مارپیچی دارند. میدان‌های جریان بند انگشتی نیز با وجود این‌که توزیع گازهای یکنواخت‌تری را نتیجه می‌دهند؛ افت فشار آنها بزرگ‌تر از میدان موازی و مارپیچی است.

به منظور استفاده از مزیت کانال‌های موازی (افت فشار پایین) و غلبه بر مشکل عدم توزیع یکنواخت گاز و دما در این کانال‌ها؛ می‌توان از کانال‌های موازی همراه با مانع استفاده کرد [۵-۷]. مانع در داخل کانال‌های جریان، با فشار دادن واکنش‌دهنده‌ها به لایه پخش گاز و به تبع آن لایه کاتالیست، باعث بالا بردن نرخ واکنش و بهبود عملکرد پیل سوختی می‌شود. همچنین، جریان ناشی از مانع، آب مایع را از پیل به بیرون بهتر منتقل و حذف می‌کند. با افزایش تعداد موانع، توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌دهنده در لایه پخش گاز دست یافتنی است. در مقایسه با یک کانال کاملاً مسدود، کانال نیمه مسدود منجر به توزیع نسبتاً یکنواخت واکنش‌دهنده‌ها شده و مشکل افت فشار زیاد را کاهش می‌دهد.

در مطالعه تیتاکامل و همکاران [۸]، عملکرد یک پیل سوختی با میدان جریان کاتد بند انگشتی و مانع وسط با سطح فعال ۱۰۰۰ سانتی مترمربع به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند، زمانی که اکسید کننده اکسیژن باشد هر دو هندسه ارائه شده عملکردی مشابه دارند؛ ولی هنگام استفاده از هوا با توجه به نرخ جریان هوا، حداکثر توان خروجی توسط میدان جریان بند انگشتی با مانع مسدود کننده حاصل می‌شود که $1/3$ برابر میدان جریان معمولی است. گوا و همکاران [۹] با ارائه مدلی جدید با آرایش پین‌ها (مشابه موانع داخل کانال)، نشان دادند که این آرایش باعث بهبود کارایی پیل سوختی پلیمری می‌شود. کوچک بودن افت فشار باعث ایجاد نقاط راکد (مرده) و توزیع جریان غیر یکنواخت در سطح پیل می‌شود. با توجه به نتایج آرایش جدید، میدان جریان پینی توزیع جریان یکنواخت‌تر از نمونه معمولی است و در نتیجه عملکرد پیل با آرایش جدید بهبود یافته است. پال و همکاران [۱۰] علاوه بر تغییر الگو چیدمان پین‌ها، با استفاده از کرین متخلخل به عنوان صفحات دو قطبی، طرح جدیدی از آرایش میدان جریان پینی معرفی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در سطح مؤثر ۲۵ سانتی‌متر مربع، مدل‌های ارائه شده کارایی بیشتری نسبت به میدان مارپیچی ساده دارند. فخرالدین و همکاران [۱۱]، به شبیه‌سازی‌های عددی و بررسی تأثیر موانع مثلثی در میدان‌های جریان مارپیچی بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری و مقایسه آن با میدان جریان بدون مانع پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که میدان جریان با پیکربندی موانع می‌تواند چگالی توان را تا 8% بهبود بخشد؛ در حالی که چگالی جریان در مقایسه با میدان جریان بدون مانع 6% افزایش می‌یابد. پرنک و وو [۱۲] تأثیر وجود مانع دوزنقه‌ای در کانال کاتد پیل سوختی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که وجود مانع در کانال کاتد باعث می‌شود اکسیژن به لایه پخش گاز نفوذ کند و از این‌رو غلظت اکسیژن در لایه کاتالیست افزایش یافته و باعث افزایش کارایی پیل سوختی می‌شود. حیدری و

همکاران [۱۳] روی تأثیر مانع در کانال کاتد تحقیق کردند. هیدروژن قدرت نفوذ بالایی دارد، بنابراین نیازی به مانع در کانال آند نبوده است. اما در کاتد وجود مانع باعث می‌شود که اکسیژن به سمت لایه پخش گاز برود و باعث افزایش کارایی پیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که علی‌رغم افت شدید فشار با مانع کامل، توان خالص خروجی نسبت به کانال با مانع، کمی بیشتر است. حیدری و همکاران [۱۴] با قرار دادن موانع در کانال‌های موازی، کارایی پیل سوختی را بررسی کردند. در این تحقیق موانع، با دو روش به صورت موازی در یک راستا و دیگری پراکنده در کانال قرار داده شده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه این دو نوع میدان جریان با نمونه بدون مانع حاکی از این است که وجود مانع باعث افزایش افت فشار و افزایش کارایی پیل سوختی می‌گردد. ارواشده و همکاران [۱۵] در مورد انتقال آب در کانال کاتد با مانع جزئی به وسیله رادیوگرافی نوترونی تحقیقاتی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که مانع به صورت کامل یا جزئی علاوه بر افزایش کارایی پیل، باعث توزیع یکنواخت آب مایع تولیدی می‌شود. افشاری و همکاران [۱۶] روی میدان‌های جریان با مانع جزئی و فوم فلزی تحقیق و بررسی کردند. مقایسه نتایج این دو میدان کانال موازی نشان می‌دهد که عملکرد آن‌ها نسبت به میدان با کانال موازی بهبود یافته است. میدان جریان با فوم فلزی نسبت به دو میدان دیگری برتری دارد؛ زیرا توزیع چگالی جریان و دمای یکنواخت‌تری دارد.

در مطالعات پیشین به بررسی توزیع دما و تأثیر آن بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری با کانال‌های همراه با مانع پرداخته نشده است. از این‌رو در این مقاله به مدل‌سازی سه بعدی و دو فازی پیل سوختی با کانال‌های کاتد با مانع پرداخته شده و عملکرد پیل بررسی می‌گردد. علاوه بر مقایسه عملکرد الکتروشیمیایی دو پیل با کانال‌های با و بدون مانع، تأثیر مانع بر بیشینه دما و توزیع دما داخل دو مدل پیل سوختی بررسی و مدل‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۲- مدل‌سازی عددی

با توجه بالا بودن هزینه مالی و زمانی آزمایش‌های تجربی، از دینامیک سیالات محاسباتی که ابزار مفیدی برای کاهش هزینه‌های مدل‌سازی است، استفاده می‌شود. برای سهولت در روند حل، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود. الف) دمای عملکردی پیل سوختی 80°C درجه سلسیوس است. ب) پیل سوختی در شرایط پایا عمل می‌کند. ج) جریان در طول کانال آرام است. د) جریان گازهای ورودی تراکم‌ناپذیر هستند. ه) از مقاومت تماسی در فصل مشترک محل‌های اتصال صرف‌نظر می‌شود. و) از تغییر شکل لایه پخش گاز به علت فشار اسمبلی صرف‌نظر می‌شود. ز) غشا برای فاز گاز نشت‌ناپذیر است. ح) نواحی متخلخل داخل پیل همگن هستند [۱، ۱۱]. با توجه به متقارن بودن جریان در کانال همراه با مانع و برای کاهش هزینه محاسباتی، مطابق شکل ۱ نیمی از کانال مدل‌سازی شده است.

۳- معادلات حاکم

در پیل سوختی غشا پلیمری، معادلات حاکم، چهار معادله اصلی بقا جرم، بقا مومنتوم، بقا گونه‌های جرمی و بقای انرژی است که برای تمام مخلوط گازی آند و کاتد استفاده می‌شود. حل معادلات حاکم به دو صورت می‌تواند انجام شود. در روش اول دامنه حل به چندین زیر

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu^{\text{eff}} \nabla \vec{u}) + S_p \quad (2)$$

در رابطه بالا، P فشار و S_p جمله چشمه می‌باشد. جمله چشمه در نواحی متخلخل مطابق معادله (۳) به دست می‌آید.

$$S_p = -\frac{\mu}{K_p} \varepsilon \vec{u} \quad (3)$$

پارامتر K_p نفوذپذیری محیط متخلخل است. در کانال‌ها که نفوذ بالا است؛ جمله چشمه صفر بوده و کانال به عنوان یک محیط با تخلخل بالا عمل می‌کند.

۳-۳- معادله بقا گونه‌های جرمی

بر اساس قانون فیک، انتقال گونه‌ها از معادله (۴) محاسبه می‌گردد.

$$\nabla \cdot (\vec{u} \varepsilon \rho C_j) = \nabla \cdot (\rho D_j^{\text{eff}} \nabla C_j) + S_j \quad (4)$$

در رابطه بالا، C_j غلظت گونه j و D_j^{eff} ضریب پخش موثر گونه j است. گونه‌های جرمی در واکنش‌ها H_2 ، H_2O ، O_2 و N_2 هستند که سه جز اول به وسیله معادله‌های (۵)، (۶) و (۷) به دست آمده و به عنوان جمله چشمه در معادله ۴ قرار می‌گیرد.

$$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2FC_{\text{total},a}} \quad (5)$$

$$S_{O_2} = -\frac{j_c}{4FC_{\text{total},c}} \quad (6)$$

$$S_{H_2O} = \frac{j_c}{2FC_{\text{total},c}} \quad (7)$$

j چگالی جریان الکتریکی موضعی و C_{total} غلظت مولی است. F ثابت فارادی و زیرنویس‌های a و c به ترتیب مربوط به آند و کاتد است. ضریب پخش گاز نیز از معادله (۸) بدست می‌آید [۱۷، ۱۹].

$$D_j^{\text{eff}} = \varepsilon^{0.5} (1-s) r_s D_j^0 \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (8)$$

D_j^0 ضریب پخش مرجع گونه j در شرایط استاندارد، r_s اشباع مسدودسازی حفره جریان و s کسر اشباع آب است.

۳-۴- معادله بقا انرژی

معادله (۹) رابطه بقا انرژی در پیل سوختی را بیان می‌کند [۱۷].

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} (\vec{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (9)$$

ρ چگالی، k_{eff} رسانایی گرمایی مؤثر است و از رابطه (۱۰) حساب می‌شود. S_h جمله چشمه ناشی از برگشت‌ناپذیری واکنش، گرمای اهمی و گرمای ناشی از تغییر فاز است و از معادله (۱۱) به دست می‌آید. C_p ظرفیت گرمایی ویژه است.

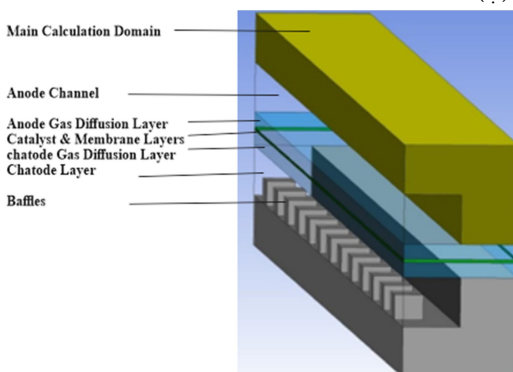
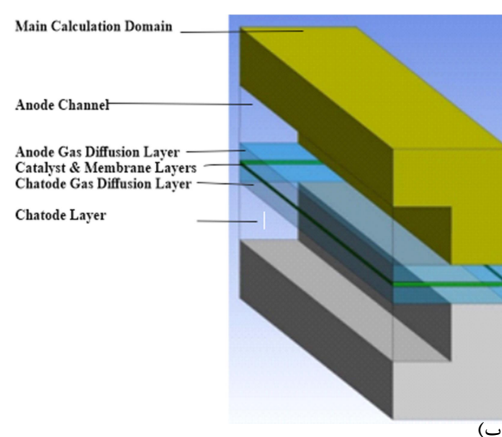
$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_f + (1-\varepsilon) k_s \quad (10)$$

k_f و k_s رسانایی گرمایی سیال و جامد است.

$$S_h = R_{\text{ohm}} I^2 - R_{a,c} h_{\text{act}} + r_w h_1 + h_{\text{reaction}} \quad (11)$$

$R_{\text{ohm}} I^2$ گرمای اهمی و R_{ohm} مقاومت الکتریکی است. $r_w h_1$

دامنه تقسیم می‌شود و سپس تمامی معادلات در هر یک از زیر دامنه‌ها حل می‌شوند. در این شیوه از حل باید شرایط مرزی مناسبی بین هر یک از زیر دامنه‌ها اعمال شود. به این شرایط مرزی، شرایط مرزی داخلی گفته می‌شود. چون شرایط مرزی داخلی نامشخص می‌باشند؛ استفاده از روش حل چند ناحیه‌ای باعث پیچیده شدن حل و گرفتن نتایج نه‌چندان دقیق می‌گردد. شیوه حل تک‌ناحیه‌ای که نیازمند تعریف شرایط مرزی داخلی نیست و برای حل معادلات حاکم بر پیل مناسب است. مزیت استفاده از مدل این است که شرایط مرزی تنها در مرز(های) بیرونی مشخص می‌گردد و نیازی به تعیین شرایط مرزی در فصل مشترک نواحی مختلف نیست. این نوع مدل‌سازی هر چند موجب سهولت در حل معادلات می‌گردد و بر دقت حل می‌افزاید؛ ولی سبب افزایش زمان محاسباتی می‌گردد.



شکل ۱- شماتیک میدان‌های جریان شبیه‌سازی شده (الف) بدون مانع (ب) بدون مانع در سمت کاتد

۳-۱- معادله بقا جرم

معادله بقا جرم به صورت معادله زیر است [۱۷].

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad \vec{u} = [u, v, w]^T \quad (1)$$

در معادله بالا، ρ چگالی، $\vec{u}$ بردار سرعت و ε ضریب تخلخل لایه‌های متخلخل است.

۳-۲- معادله بقا مومنتوم

معادله مومنتم با قانون دارسی به شکل معادله (۲) است [۱۷].

گرمای ناشی از تغییر فاز، h_l آنتالپی تغییر فاز، $R_{a,c}h_{act}$ گرمای فعال سازی واکنش، h_{act} آنتالپی فعال سازی و $h_{reaction}$ تغییرات آنتالپی ناشی از واکنش ها در کاتالیست است.

۳-۵- معادلات الکتروشیمیایی

انتقال چگالی جریان الکتریکی توسط معادله باتلر - ولمر بیان می گردد. معادله انتقال چگالی جریان الکتریکی در آند از معادله (۱۲) و در کاتد از معادله (۱۳) به دست می آید [۱۷].

$$j_a = (1-s)^{r_{c,a}} j_{a,ref} \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2,ref}} \right)^{Y_a} \left(e^{\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \right) \eta_a} - e^{\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \right) \eta_a} \right) \quad (12)$$

$$j_c = (1-s)^{r_{c,c}} j_{c,ref} \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2,ref}} \right)^{Y_c} \left(e^{\left(\frac{\alpha_c F}{RT} \right) \eta_c} - e^{\left(-\frac{\alpha_a F}{RT} \right) \eta_c} \right) \quad (13)$$

j_{ref} چگالی جریان تبادل شده مرجع، α ضریب انتقال بار الکتریکی است که مشخص کننده سهم سمت آند و کاتد در هریک از نیم واکنش ها است و به جنس الکتروست بستگی دارد. r مسدودسازی حفره در ناحیه جمع کننده جریان الکتریکی است. C غلظت موضعی گونه های جرمی، G_{ref} غلظت محلی گونه های جرمی مرجع، γ نمای وابسته غلظت، R ثابت جهانی گازها، T دما، η اضافه ولتاژ فعال سازی و ζ سطح فعال ویژه است.

انتقال الکترون توسط سطوح جمع کننده جریان، لایه های پخش گاز و لایه های کاتالیست و انتقال یون در غشا و لایه های کاتالیست برای معادله بقا باید محاسبه گردند. معادله بقا بار الکترون در الکترودها از معادله های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) محاسبه می گردد [۱۷].

$$\nabla \cdot (\sigma_s \nabla \Phi_s) + j_s = 0 \quad (14)$$

$$j_s = -j_a < 0 \quad (15) \quad (\text{الکتروآند})$$

$$j_s = +j_c > 0 \quad (16) \quad (\text{الکتروکاتد})$$

σ_s رسانای الکتریکی الکتروده، Φ_s پتانسیل الکتریکی الکترودها، j_s جریان الکتریکی حجمی عبوری است. معادله بقا بار (پروتون) در لایه های کاتالیست و غشا از معادله های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) محاسبه می گردد.

$$\nabla \cdot (\sigma_m \nabla \Phi_m) + j_m = 0 \quad (17)$$

$$j_m = +j_a > 0 \quad (18) \quad (\text{الکتروآند})$$

$$j_m = -j_c < 0 \quad (19) \quad (\text{الکتروکاتد})$$

Φ_m پتانسیل یونی غشا، j_m جریان پروتونی حجمی عبوری و σ_m هدایت پذیری پروتونی غشا است که از معادله های (۲۰) و (۲۱) محاسبه می گردد.

$$\sigma_m^{ref} = \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \begin{cases} 0.514\lambda - 0.326 & \lambda \geq 1 \\ 0.33\lambda + 0.01 & \lambda < 1 \end{cases} \quad (20)$$

λ نشان دهنده محتوی آب غشا و مشخص کننده وضعیت رطوبت در غشا پلیمری است؛ در غشا کاملاً مرطوب و در تعادل با آب اشباع مقدار آن ۲۲ و در تعادل با بخار اشباع ۱۴ است. λ تابعی از داده های آزمایشگاهی اشپینگر و از معادله های (۲۱) و (۲۲) محاسبه می شود.

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a-1) & 1 < a \leq 3 \end{cases} \quad (21)$$

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (22)$$

a فعالیت آب بوده و از نسبت غلظت مولی آب به غلظت مولی آب در حالت اشباع به دست می آید. P_{wv} فشار بخار آب و P_{sat} فشار اشباع بوده و تابع دما است.

$$(RH)P_{sat} = x_{H_2O}P \quad (23)$$

x_{H_2O} کسر جرمی آب است و از نسبت جرم بخار آب به جرم کل مخلوط بدست می آید. RH رطوبت نسبی است.

$$\log \frac{P_{sat}}{10} = -2.1794 + (0.02953\Delta T) - (9.1837 \times 10^{-5} \Delta T^2) - (1.4454 \times 10^{-7} \Delta T^3) \quad (24)$$

$$\Delta T = T - 273.17$$

ضریب درگ الکترو - اسمزیک از معادله (۲۵) محاسبه می شود.

$$n_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (25)$$

ضریب پسای الکترو - اسمزیک در حالت غشا پر آب برابر ۲/۵ است. شار پخش شده برگشتی از کاتد به آند در غشا از معادله (۲۶) محاسبه می شود [۱۹].

$$J_w^{diff} = - \frac{\rho_m M_{H_2O} D_w \nabla \lambda}{M_m} \quad (26)$$

ρ_m چگالی غشا خشک، M_m وزن معادل غشا خشک، M_{H_2O} وزن آب در غشا و D_w ضریب پخش آب در غشا است که از معادله های (۲۷) و (۲۸) محاسبه می شود.

$$D_w = f(\lambda) \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (27)$$

$$f(\lambda) = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-7} \lambda (\exp(0.28\lambda) - 1) \exp\left(-\frac{2346}{T}\right) & 0 \\ 4.17 \times 10^{-8} \lambda (161 \exp(-\lambda) + 1) \exp\left(-\frac{2346}{T}\right) & \end{cases} \quad (28)$$

واکنش های الکتروشیمیایی روی سطح کاتالیست رخ داده و پروتون ها از غشا عبور می کنند. الکترون ها از طریق صفحه دوقطبی کاتد به مدار خارجی هدایت شده و به صفحه دوقطبی آند منتقل می شوند. اضافه ولتاژ از معادله های (۲۹)، (۳۰) و (۳۱) محاسبه می شود.

$$\eta = \Phi_s - \Phi_m - V_{ref} \quad (29)$$

$$\eta_a = \Phi_a - \Phi_m; V_{ref} = 0 \quad (30) \quad (\text{آند})$$

$$\eta_c = \Phi_c - \Phi_m - V_{oc}; V_{ref} = V_{oc} \quad (31) \quad (\text{کاتد})$$

Φ پتانسیل، V_{ref} پتانسیل الکتروده مرجع و زیر نویس های a ، c ، oc ، m ، s و ref به ترتیب معرف آند، کاتد، مدار باز، غشا، جامد و مرجع است. V_{oc} ولتاژ مدار باز است و از معادله نرنست به دست می آید.

$$V_{oc} = \frac{-\Delta G_0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (32)$$

ΔG_0 تغییر انرژی آزاد واکنش در شرایط استاندارد و P_{O_2} ، P_{H_2} و P_{H_2O} فشار جزئی هیدروژن، اکسیژن و بخار آب است.

۳-۶- معادله تشکیل و انتقال آب مایع

وقتی پیل سوختی غشا پلیمری در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس کار می کند؛ می تواند مقداری از آب تولیدی در چگالی های

در این شرط مرزی، فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی صفر است. همچنین جریان در مرز خروجی توسعه یافته است.

۳-۴ - شرط مرزی دیواره‌ها

دیواره‌های خارجی در تمام مرزهای دامنه آدیاباتیک است. برای دیواره‌های کانال که در ارتباط مستقیم با جریان گاز است، شرط عدم لغزش برای سرعت و شرط همبستگی گرمایی اعمال می‌گردد.

۴-۴ - شرط مرزی الکتریکی

پتانسیل الکتریکی سمت آند در دیواره آخر جمع کننده جریان به طور قراردادی صفر است. پتانسیل الکتریکی طرف کاتد از ولتاژ مدار باز شروع می‌شود و با کم شدن ولتاژ، چگالی جریان الکتریکی از جمع کننده جریان محاسبه می‌شود. شرایط مرزی اعمال شده در تمامی نواحی پیل سوختی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی در نواحی مختلف پیل سوختی غشا پلیمری [۱۶].

ناحیه	نوع شرط مرزی	واحد	مقدار
ورودی آند	جریان جرمی	kg/s	$4/53 \times 10^{-4}$
	استوکیومتری	-	۱
	کسر جرمی هیدروژن	-	۰/۶۹
	فشار کاری	Atm	۱/۵
	دمای کاری	K	۳۵۳
ورودی کاتد	جریان جرمی	kg/s	$2/25 \times 10^{-4}$
	استوکیومتری	-	۱
	کسر جرمی اکسیژن	-	۰/۱۵
	کسر جرمی آب	-	۰/۳۱
	فشار کاری	Atm	۱/۵
دیواره جمع کننده آند	پتانسیل الکتریکی آند	V	۰
	پتانسیل الکتریکی کاتد	V	۱/۰

۵- روش حل عددی

از روش حجم محدود که از صورت انتگرالی معادله‌های بقا استفاده می‌کند، برای حل بهره معادلات حاکم استفاده می‌شود. در گسسته‌سازی معادله‌های مومنوم، گونه‌های جرمی و انرژی از روش پیشرو مرتبه دو و برای معادله‌های بار الکتریکی و انتقال غشا از روش پیشرو مرتبه اول استفاده می‌شود. برای محاسبه فشار باید در تمام نقاط حل سرعت معلوم باشد. با توجه به این که جریان تراکم‌ناپذیر است؛ از حل کننده فشار مبنا استفاده می‌شود. میدان جریان از حل معادلات مومنوم حاصل می‌شود و میدان فشار از معادله تصحیح فشار به دست می‌آید. برای ارتباط بین فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده می‌شود. در پیل سوختی غشا پلیمری، بعضی از ضرایب معادلات حاکم توابع متغیر هستند و جملات چشمه معادله‌ها ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی است. مدل جامع پیل سوختی یک مدل با معادلات غیر

جریان الکتریکی بالا به صورت آب مایع ظاهر شود. آب مایع باعث افزایش رسانایی یونی غشا می‌شود؛ اما به دلیل پر شدن منافذ لایه پخش گاز عبور واکنش‌دهنده‌ها به این لایه می‌شود و عملکرد پیل کاهش می‌یابد. مدل تشکیل و انتقال آب مایع در ناحیه‌های لایه پخش گاز و لایه کاتالیست از معادله (۳۳) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$\nabla \cdot (\rho_l \vec{v}_l s) = r_w \quad (33)$$

r_w نرخ میعان در لایه پخش گاز و کاتالیست، زیر نویس ۱ آب مایع و s کسر حجمی آب و از معادله (۳۴) به دست می‌آید [۱۵].

$$r_w = \begin{cases} (1-s)c_r \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{H_2O} & P_{wv} > P_{sat} \\ s c_r \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{H_2O} & P_{wv} < P_{sat} \end{cases} \quad (34)$$

c_r ضریب ثابت میعان آب است. در نواحی متخلخل با مقاومت بالا، با فرض برابری سرعت‌های گاز و مایع داخل کانال‌های جریان، هنگام استفاده از جمله پخش موئینی می‌توان سرعت را با جمله جابجایی جایگزین کرد.

$$\nabla \cdot \left(\rho_l \left(K_p s^3 \frac{dP_c}{ds} \nabla s \right) \right) = r_w \quad (35)$$

K_p نفوذپذیری ناحیه متخلخل و μ_l لزجت آب مایع است. P_c فشار موئینی است و بر اساس تابع لورت محاسبه می‌شود [۱۷].

۴- شرایط مرزی

بر اساس معادلات حاکم، γ مجهول Φ ، T ، P ، u ، v ، w وجود دارند (C_i غلظت اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و آب است) که برای حل این مجهولات دستگاه معادلات حاکم تشکیل می‌شود. برای حل این معادلات باید شرایط مرزی مناسبی مشخص گردد. با توجه به استفاده از مدل‌سازی به روش تک ناحیه‌ای، فقط شرایط مرزی خارجی مشخص می‌شود و نیاز به شرط مرزی درون پیل سوختی نیست.

۴-۱- شرط مرزی ورودی

دبی جرمی مرزهای ورودی واکنش‌دهنده‌ها به پیل سوختی در دو سمت آند و کاتد معلوم است و از معادلات (۳۷) و (۳۸) محاسبه می‌گردند [۱۷].

$$\dot{m}_{inlet,a} = \frac{\zeta_a I_{ref} A_{MEA} M_{H_2}}{n_a F x_{in}^{H_2}} \quad (\text{سمت آند}) \quad (37)$$

$$\dot{m}_{inlet,c} = \frac{\zeta_c I_{ref} A_{MEA} M_{O_2}}{n_c F x_{in}^{O_2}} \quad (\text{سمت کاتد}) \quad (38)$$

n تعداد الکترون‌ها که مقدار آن در سمت آند ۲ و در سمت کاتد ۴ است. I_{ref} جریان الکتریکی مرجع، A_{MEA} سطح فعال، ζ استوکیومتری جریان، $x_{in}^{O_2}$ کسر مولی اکسیژن در گاز مرطوب ورودی و $x_{in}^{H_2}$ کسر مولی هیدروژن، M_{H_2} و M_{O_2} به ترتیب جرم‌های مولکولی هیدروژن و اکسیژن هستند. فشار جزئی بخار آب در ورودی، با فشار اشباع در دمای مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر ورودی برابر است. دمای گازهای ورودی ۸۰ درجه سلسیوس فرض می‌شوند.

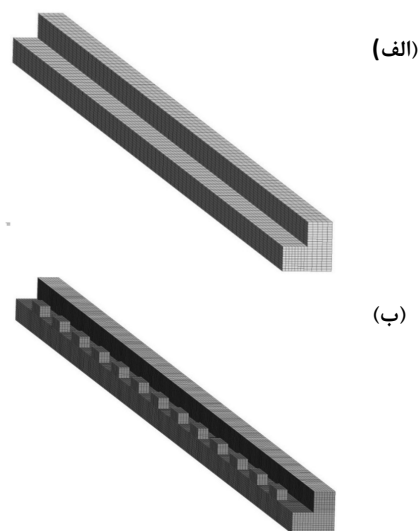
۴-۲- شرط مرزی خروجی

در خروجی‌های کانال‌ها، شرط مرزی فشار خروجی اعمال می‌شود.

خطی است که نیازمند روش‌های عددی مناسب برای حل است. معادلات حاکم، غیرخطی و وابسته به هم هستند که برای رسیدن به همگرایی در حل عددی باید به صورت تکراری صورت گیرد. با انتخاب ولتاژ پیل نزدیک به ولتاژ مدار باز حل عددی شروع می‌شود. در معادله بالتر - ولمر با استفاده از اضافه ولتاژ فعال‌سازی چگالی جریان محلی محاسبه می‌شود و در ادامه میدان‌های جریان سرعت و فشار محاسبه می‌شود. سپس معادلات کسر جرمی برای کسرهای جرمی اکسیژن، هیدروژن، بخار آب و نیتروژن حل می‌شوند و در ادامه، معادلات اسکالر حل می‌شوند. در مرحله بعد معادلات انتقال بار و چگالی‌های جریان محلی بر اساس معادله بالتر - ولمر حل می‌گردند.

۵-۱- شبکه‌بندی

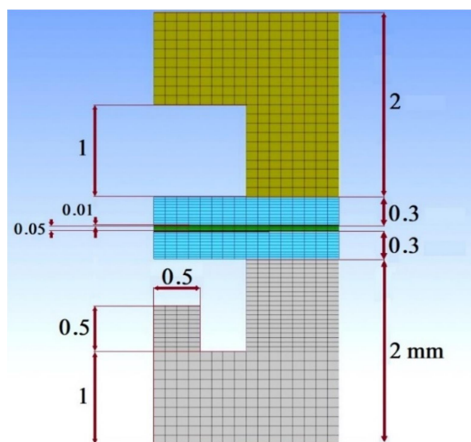
هندس و شرایط جریان در این دامنه حل متقارن است؛ در نتیجه برای کاهش هزینه محاسباتی نیمی از هر کانال شبکه‌سازی می‌شود. شبکه‌بندی میدان جریان کاتد بدون مانع و همراه با ۱۳ مانع در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۲ ب، شبکه محاسباتی در میدان جریان همگی به یک اندازه نیستند. با توجه به موقعیت هر قسمت پیل، اندازه شبکه متفاوت است. در راستای محور Z قبل و بعد از هر مانع باید شبکه محاسباتی ریز شود. حداقل فاصله برای کوچک‌سازی شبکه محاسباتی قبل از مانع ۱ میلی‌متر و برای بعد از مانع ۲ میلی‌متر است. به علت محدودیت‌های محاسباتی، حداکثر تعداد مانع مورد استفاده در دامنه حل، ۱۳ عدد است. ابعاد هندسی مدل‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲- شبکه‌بندی میدان جریان (الف) میدان بدون مانع (ب) میدان با مانع

طول کانال ۷۰ و ارتفاع و عرض آن به ترتیب ۱ و ۲ میلی‌متر است. ضخامت لایه پخش گاز، کاتالیست و غشا ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۵ میلی‌متر است. طول، ارتفاع و عرض مانع نیز به ترتیب، ۲، ۰/۵ و ۱ میلی‌متر می‌باشد. در جهت طول کانال طول هر شبکه ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است؛ اما شرایط قبل و بعد هر مانع بسیار مهم

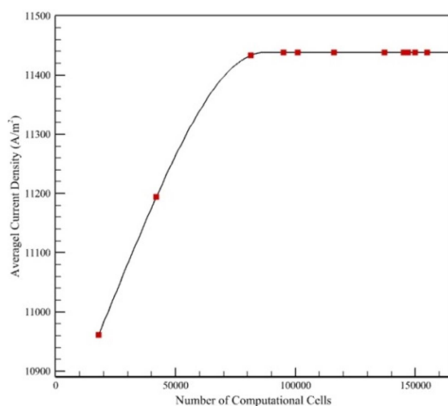
است، در نتیجه شبکه محاسباتی در این دو بخش و مخصوصاً بعد از مانع باید کوچک‌تر شود. برای کوچک‌سازی کافیت ۱ میلی‌متر قبل از مانع و هم اندازه با طول مانع بعد از مانع، شبکه‌ها را کوچک کرد.



شکل ۳- نمای روبه رو (X-Y) کانال‌های با مانع و المان‌های شبکه‌بندی

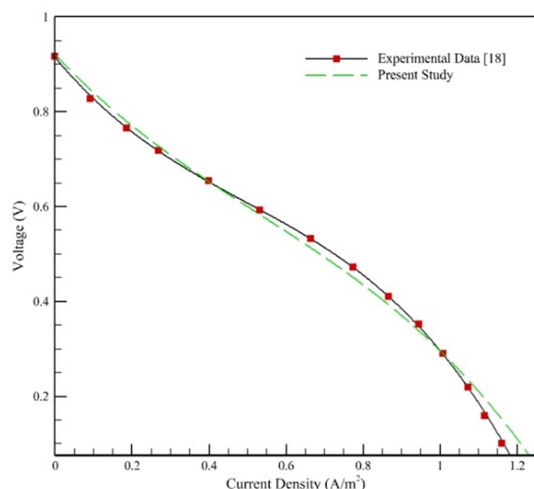
۵-۲- استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی

تعداد شبکه محاسباتی طوری باید انتخاب شود؛ که نتایج حل عددی مستقل از تعداد شبکه گردد. برای نمونه در مدل بدون مانع و در ولتاژ ۰/۶۵ ولت، چگالی جریان برای چهار شبکه‌بندی، درشت (۲۱۹۴۰)، متوسط (۴۴۲۶۰)، ریز (۸۱۹۰۰) و خیلی ریز (۱۴۴۷۲۰) محاسبه شده است و در شکل ۴ نمایش داده شده است. چگالی جریان با افزایش تعداد شبکه از ریز به خیلی ریز، تغییرات کمی داشته است و به همین دلیل شبکه ریز با تعداد شبکه محاسباتی برابر با ۸۱۹۰۰، به عنوان شبکه نهایی انتخاب شده است.



شکل ۴- تغییرات چگالی جریان بر حسب تعداد شبکه محاسباتی در ولتاژ ۰/۶۵ ولت

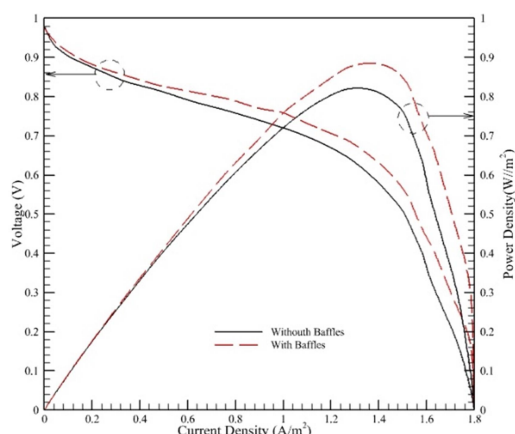
لازم به ذکر است که حین شبکه‌بندی مدل، تعداد شبکه در راستای ضخامت لایه‌ها و همچنین نواحی نزدیک مانع‌ها شبکه ریز شده است.



شکل ۵- منحنی قطبش نتایج عددی حاضر و داده‌های آزمایشگاهی [۲۲]

۲-۶- منحنی عملکرد

در حل عددی برای هر مدل ولتاژی نزدیک به ولتاژ مدار باز (۰/۹۵ ولت) اعمال شده و حل انجام می‌شود. پس از اتمام حل، ولتاژ را با گام کاهشی (۰/۰۵ ولت) کم کرده و حل مجدداً انجام می‌شود. این روند تا زمانی که مقدار اولیه ولتاژ ۰/۰۵ ولت شود، ادامه می‌یابد. پس از حل در هر ولتاژ، جریان الکتریکی را از نتایج استخراج کرده تا منحنی عملکرد در قالب منحنی‌های چگالی جریان - ولتاژ و چگالی جریان - چگالی توان برای مدل پیل بابدون مانع ترسیم گردد. در مدل با ۱۳ مانع بیشترین چگالی توان تولید شده مربوط به ولتاژ ۰/۶۵ ولت است و ولتاژ معیار برای مقایسه می‌باشد. در شکل ۶ عملکرد دو مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند که حاکی از بهبود عملکرد پیل سوختی به علت موانع در میدان جریان است و باعث توزیع یکنواخت گازهای واکنش‌گر درون کانال می‌شود.



شکل ۶- منحنی‌های چگالی جریان - ولتاژ و چگالی

جریان - چگالی توان برای مدل پیل سوختی با / بدون مانع

عملکرد پیل با مانع در چگالی جریان‌های پایین و متوسط تفاوت کمی با پیل همراه با مانع دارد و با افزایش چگالی جریان این تفاوت زیاد می‌شود. علت این امر این است که در چگالی جریان‌های بالا، افت

۵-۳- پارامترها و خواص قسمت‌های مختلف پیل سوختی

در شبیه‌سازی پیل سوختی پس از انتخاب شرایط مرزی، بایستی پارامترها و خواص مدل‌سازی مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب گردد. خواص قسمت‌های مختلف پیل سوختی در جدول ۲ و پارامترهای فیزیکی و الکتروشیمیایی مدل‌سازی نیز در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲- خواص نواحی مختلف پیل سوختی غشا پلیمری [۱۸، ۲۲]

خصوصیت	واحد	جمع کننده جریان	لایه پخش گاز	لایه کاتالیست	غشا
چگالی	kg m^{-3}	۲۷۱۹	۲۷۱۹	۲۷۱۹	۱۹۸۰
گرمای ویژه	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	۸۷۱	۸۷۱	۸۷۱	۲۰۰۰
رسانایی گرمایی	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	۱۰۰	۱/۴	۱۰	۲
رسانایی الکتریکی	$\text{S}^{-1} \text{m}^{-1}$	۲۲۰۰۰	۲۴۳۷	۱۰۰	10^{-16}
ضریب تخلخل	-	-	۰/۴	۰/۴	۰/۵
نفوذپذیری	m^2	-	$1/7 \times 10^{-11}$	$1/7 \times 10^{-11}$	-
زاویه تماس	°	-	۱۳۵	۱۰۰	-

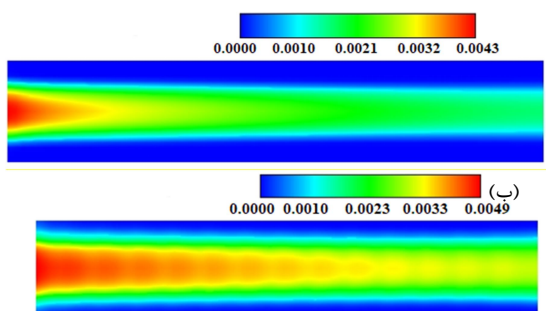
جدول ۳- پارامترهای الکتروشیمیایی مدل‌های شبیه‌سازی شده [۱۸، ۲۲]

پارامتر	واحد	مقدار
دمای عملکرد	K	۳۵۳
فشار عملکرد	Atm	۱/۵
ثابت فارادی	C mol^{-1}	۹۶۴۸۷
چگالی جریان مرجع آند و کاتد	A m^{-2}	۶ و ۴۷۰۰
غلظت مرجع آند و کاتد	kmol m^{-3}	۰/۰۰۳۳۹ و ۰/۰۵۶۴
توان غلظتی آند و کاتد	-	۱ و ۰/۵
ضریب تبادل آند و کاتد	-	۱/۵ و ۰/۵
ولتاژ مدار باز	V	۱
ضریب پخش مرجع هیدروژن	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	3×10^{-5}
ضریب پخش مرجع اکسیژن	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$3/2 \times 10^{-5}$
ضریب پخش مرجع بخار آب	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$7/35 \times 10^{-5}$
ضریب پخش نیتروژن	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	3×10^{-5}
ضریب توانی مسدودسازی اشباع	-	۳

۶- نتایج

۶-۱- اعتبارسنجی مدل عددی پیل سوختی

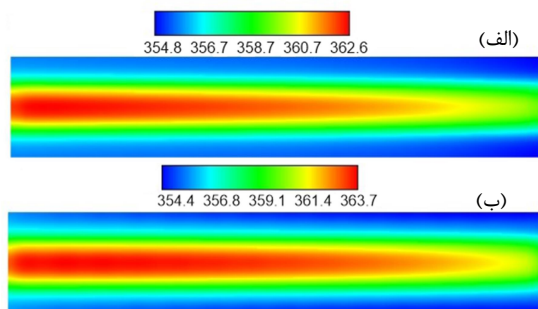
به منظور اعتبار سنجی مدل عددی، یک پیل با ابعاد و مشخصات نمونه آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [۲۲]، مدل‌سازی شده است. پیل به صورت سه‌بعدی، تک کانال و شامل جمع‌کننده‌های جریان الکتریکی، کانال‌های گاز، لایه‌های پخش گاز، لایه‌های کاتالیست و غشا شبیه‌سازی شده است. در شکل ۵ منحنی قطبش مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و بیشینه خطا ۸ درصد است. داده‌های ارائه شده در مقاله مربوط به چگالی جریان‌های تا حدود ۱ آمپر بر سانتیمتر مربع بوده است؛ از این‌رو مدل عددی نیز تا این چگالی جریان اجرا شده و نتایجش ارائه شده است.



شکل ۸- توزیع غلظت آب (بر حسب کیلو مول بر متر مکعب) در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، (الف) بدون مانع، (ب) با مانع

۴-۶- توزیع دما

دمای عملکردی پیل سوختی غشا پلیمری ۸۰ درجه سلسیوس فرض شده است؛ اما در روند انجام واکنش در پیل، دما افزایش می‌یابد. دما در دو ناحیه، سطح کانال کاتد و سطح مشترک لایه پخش گاز با لایه کاتالیست بررسی گردیده است. در شکل ۹ توزیع دما در سطح مشترک لایه کاتالیست و لایه پخش گاز نمایش داده شده است. افزودن مانع باعث افزایش نفوذ و غلظت اکسیژن در فصل مشترک لایه پخش گاز با کاتالیست می‌شود و با افزایش نفوذ اکسیژن نرخ واکنش بالا می‌رود. یکی از پیامدهای افزایش نرخ واکنش، تولید گرمای بیشتر در فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست است. در مدل همراه با مانع بیشینه دما بیشتر از ۱ کلون افزایش یافته، زیرا نرخ واکنش به علت نفوذ بیشتر اکسیژن افزایش یافته است. دمای بیشینه در ابتدای لایه کاتالیست به وجود نمی‌آید، پس از گذشت چند میلی‌متر از ابتدای لایه کاتالیست دمای بیشینه رخ می‌دهد. در مدل با مانع موقعیت مکانی اولین مانع در راستای محور Z نزدیک به دهانه ورودی کانال است، به همین علت قبل از افزایش دما و رسیدن به دمای بیشینه با پدیده کاهش موضعی دما بالای مانع روبه‌رو می‌شود.



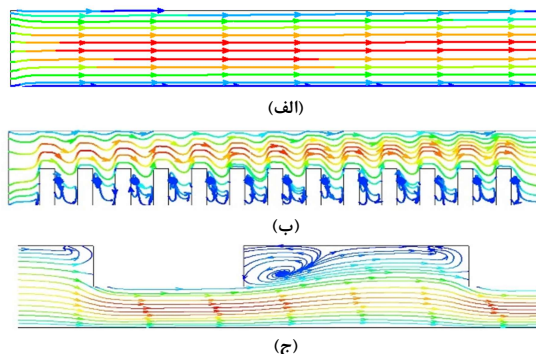
شکل ۹- توزیع دما (بر حسب کلون) در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست، (الف) مدل بدون مانع، (ب) مدل با مانع

افزایش دمای فصل مشترک باعث افزایش دمای سیال درون کانال کاتد می‌شود. با افزایش قرار دادن مانع در کانال کاتد دمای بیشینه کانال نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شرایط مدل‌سازی، فصل مشترک لایه پخش گاز و کاتالیست یک محور تقارن دارد که دمای بیشینه بر روی این محور تشکیل می‌شود. دمای نقاط روی این خط در فصل مشترک، برای مدل با مانع در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. انجام واکنش در پیل باعث افزایش دما می‌شود، افزایش دما در ابتدا محور تقارن فصل

غلظتی غالب است و با قرار دادن مانع، انتقال اکسیژن به سمت لایه کاتالیست زیاده‌تر شده و از این رو افت غلظتی کاهش می‌یابد. با توجه به افزایش ولتاژ پیل سوختی با کانال همراه با مانع، چگالی توان نیز در پیل با مانع بالاتر از پیل سوختی بدون مانع است؛ به طوری که بیشینه چگالی توان تولیدی در پیل با مانع، به مراتب بیشتر از چگالی توان برای پیل بدون مانع است. در چگالی جریان های متوسط که افت های اهمی غالب هستند نیز تفاوت عملکرد پیل با / بدون مانع مشهود است.

۶-۳- توزیع سرعت

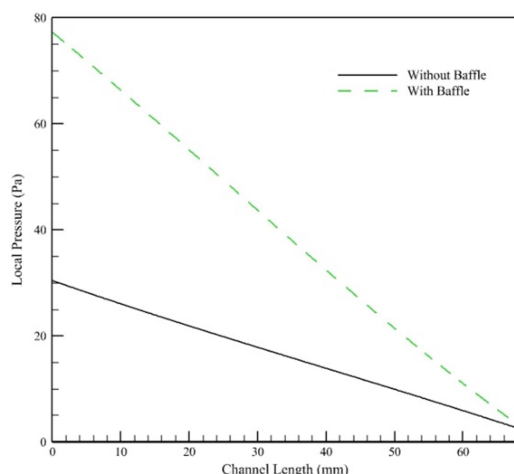
تمام نتایج که به شکل کانتور و نمودار نمایش داده شده‌اند، از جمله توزیع سرعت، توزیع دما، توزیع فشار و توزیع گونه‌های جرمی برای سمت کاتد در نظر گرفته شده است. در شکل ۷ خطوط جریان برای مدل‌های پیل با و بدون مانع در کانال کاتد نمایش داده شده است. جریان گردابه‌ای بعد از هر مانع تشکیل می‌شود که باعث انتقال اکسیژن بیشتر به داخل لایه پخش گاز و به تبع آن به لایه کاتالیست می‌شود. برای نمایش بهتر خطوط جریان بعد از مانع تصویر را برای مانع اول بزرگ‌نمایی شده است. در روند شبیه‌سازی دیواره‌های مانع و کانال از جنس جامد غیر قابل نفوذ قید گذاری شده‌اند و شرط مرزی دیواره‌های داخلی پیل سوختی، شرط عدم لغزش اعمال شده است.



شکل ۷- خطوط جریان در میدان جریان مدل‌های شبیه‌سازی شده، (الف) مدل بدون مانع، (ب) مدل همراه با مانع و (ج) خطوط جریان میان دو مانع

با افزایش نفوذ اکسیژن به فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست به علت حضور مانع در میدان جریان نرخ واکنش و آب تولیدی در این فصل مشترک افزایش می‌یابد در شکل ۸ کانتورهای غلظت آب در این ناحیه نمایش داده شده است. با قرار دادن مانع به تعداد زیاد در کانال کاتد، آب تولیدی نیز افزایش یافته ، به طوری که در آن توزیع آب تولیدی نیز، یکنواخت‌تر است و مقدار بیشینه غلظت آب در فصل مشترک بیشتر از مدل بدون مانع است. علت این امر این است که غلظت بالاتر اکسیژن ناشی از موانع باعث می‌شود که نرخ واکنش در سمت کاتد افزایش یابد و مقدار آب بیشتری تولید گردد. البته افت فشار داخل کانال با مانع نیز بالاتر است که منجر به خروج آب از داخل پیل سوختی می‌گردد

کانال کاتد برای دو مدل در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. افت فشار مدل ۱۳ همراه با مانع ۲/۶ برابر مدل بدون مانع است. هر قدر در طول مسیر به علت افزایش تعداد مانع افت فشار بیشتر شود، توزیع گازهای واکنش‌گر درون میدان جریان یکنواخت‌تر می‌شود؛ اما بایستی توجه داشت که افزایش افت فشار نیز باعث افزایش توان پارازیتی سیستم می‌شود و باید مصالحه‌ای بین افت فشار و عملکرد پیل انجام شود. باید توجه داشت هر چند که افت فشار در مدل با مانع از مدل کانال‌های بدون مانع بیشتر است؛ اما افت فشار در کانال با مانع نسبت به افت فشار در کانال‌های مارپیچی بسیار کمتر است. این موضوع در مقالات متعدد اثبات گردیده و نشان داده شده است [۲۳، ۲۱].



شکل ۱۲- میانگین فشار در طول کانال کاتد برای کانال‌های با و بدون مانع

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مدل‌سازی عددی میدان جریان پیل سوختی غشا پلیمری همراه با قرار دادن مانع داخل کانال کاتد پرداخته شده است. نتایج میدان‌های مدل شده مانع‌دار با میدان موازی ساده مقایسه گردیده است. مهمترین نتایج به شرح زیر است.

(الف) حضور مانع باعث افزایش نفوذ اکسیژن در لایه پخش گاز می‌شود و با افزایش تعداد مانع، توزیع یکنواخت‌تر می‌گردد. در انتها کانال کاتد با مانع، گازهای واکنش‌گر تکنواخت‌تر توزیع شده‌اند، این مزیت باعث پایداری غشا و عدم شکل‌گیری نقاط دما بالا می‌شود.

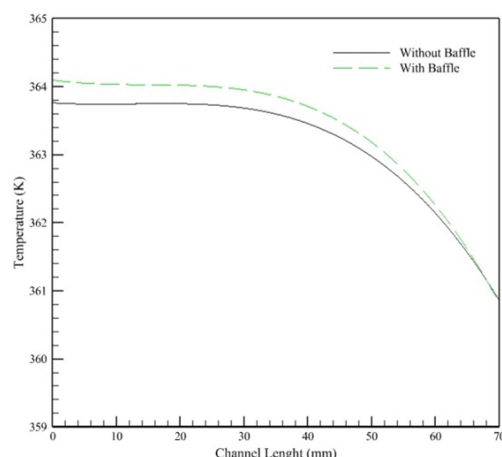
(ب) حضور مانع باعث می‌شود بیشینه دمای پیل سوختی کاهش یافته و توزیع دما داخل پیل نسبت به کانال موازی ساده یکنواخت‌تر شود.

(ج) با افزودن مانع در کانال کاتد، در کنار بهبود عملکرد گرمایی پیل، عملکرد کلی پیل سوختی (در قالب منحنی عملکرد) بهبود می‌یابد.

(د) استفاده از مانع در کانال کاتد باعث افزایش افت فشار شده و توان پارازیتی سیستم پیل سوختی را افزایش می‌دهد. هر چند که افت فشار ایجاد شده در اثر مانع، بسیار کمتر از کانال‌های مارپیچی به عنوان میدان جریانی متداول، است.

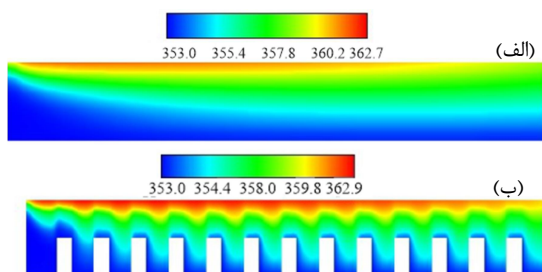
(ه) استفاده از چندین مانع در کانال و افزایش تعداد موانع باعث می‌شود که الگوی کانال با مانع به سمت الگوی کانال موجی سوق پیدا کرده و عملکرد گرمایی و الکتروشیمیایی پیل سوختی غشا پلیمری بهبود یابد.

مشترک کاملاً مشخص است، سپس دما به علت مصرف اکسیژن و کاهش نرخ واکنش در راستای طول پیل رو به کاهش می‌رود.



شکل ۱۰- دما روی خط محور تقارن در فصل مشترک لایه پخش گاز و لایه کاتالیست

توزیع دما در کانال کاتد برای مدل با و بدون مانع در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. با مقایسه توزیع دمای مدل‌ها، در انتهای کانال، در فصل مشترک کانال و لایه پخش گاز دما کاهش یافته است؛ زیرا نرخ واکنش در انتها کانال به علت کمبود گازهای واکنش‌گر کاهش یافته شده است. در مدل همراه با مانع به علت توزیع و نفوذ یکنواخت‌تر اکسیژن در لایه پخش گاز، در انتهای کانال کاهش نرخ واکنش کمتر است و نسبت به مدل دیگر نرخ واکنش بیشتر است. با دقت در کانتورهای توزیع دما کاملاً مشهود است که مدل با مانع توزیع دمای یکنواخت‌تری نسبت به مدل بدون مانع دارد؛ زیرا مدل با مانع گازهای واکنش‌گر را یکنواخت‌تر توزیع می‌کند. در انتهای فصل مشترک کانال کاتد و لایه پخش گاز مطابق شکل ۱۱ ب نقاط قرمز رنگ بیشتری نمایش داده شده است؛ این نقاط به معنای انجام واکنش بیشتر نسبت به دیگر مدل‌ها است.



شکل ۱۱- کانتور توزیع دما (بر حسب کلونین) در کانال کاتد، (الف) مدل بدون مانع، (ب) مدل با مانع

هر چند که اضافه کردن مانع در کانال‌ها باعث بهبود عملکرد الکتروشیمیایی و گرمایی پیل سوختی می‌شود؛ اما افت فشار هوا در سمت کاتد نیز بیشتر می‌شود. افت فشار بیشتر منجر به بالا رفتن توان پارازیتی سیستم پیل سوختی می‌گردد. مقایسه میانگین فشار در طول

- [20] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *Journal of The Electrochemical Society*. 1991; 138(8):2334-2342.
- [21] Sharfabadi M M, Parsanezhad A, Valoujerdi A Gh. Numerical Investigation of Water Droplet Flow in the Cathode Channel of a PEM Fuel Cell with Blocked Flow Channel. *Journal of Farayandno*. 2023; 17(80):60-76.
- [22] Mazumder S, Cole J V R. 3-D mathematical modeling of PEM fuel cells II. Model predictions with liquid water transport. *Journal of The Electrochemical Society*. 2003; 150, 1510-1517.
- [23] Hyeok K, Jaeyeon K, Dasol K, Geon Hwi K, Obeen K, Hyeonjin Ch, Heesoo Ch, Hongnyoung Y. Mass diffusion characteristics on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells with serpentine channels of different width. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 183, 122106.
- [1] Atyabi SA, Afshari E. Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side. *Journal of cleaner production*. 2019; 214:738-748
- [2] Deng X, Zhang E, Lei J, Jia D , Liu Y, Shuchao H E. Numerical Study on the Effect of an Improved Three-Partition Baffle Flow Field on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance. *ACS Omega*. 2022; 7:42872–42882.
- [3] Xu Ch, Wang H, Li Zh, Cheng T. Effects of the Design and Optimization of Trapezoidal Channels and Baffles (Number and Position on the Net Power Density of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells. *ACS Omega*. 2022; 7(5):4214-4223.
- [4] Manso A P. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012; 36:1-32.
- [5] Yonghua C, Jingming S, Wei F, Chen B. Effect of Baffle Dimensionless Size Factor on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Energies*. 2022; 15:3812.
- [6] Lochner T, Kluge R M, Fichtner J, El-Sayed A, Garlyyev B, Bandarenka A S. Temperature Effects in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *ChemElectroChem*. 2020; 7(17):3545-3568
- [7] Feng S, Dandan Su , Yujie Y, Pang B, Jiancheng G. Effects of Combined Baffles on the Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance. *Int J Electrochem Sci*. 2022; 17:221134.
- [8] Thitakamol V, Therdthianwong A, Therdthianwong S. Mid-baffle interdigitated flow fields for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011; 36:3614-3622.
- [9] Guo N, Leu M C, Koylu U O. Network based optimization model for pin-type flow field of polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013; 38(16):6750–6761.
- [10] Pal V, Karthikeyan P, Anand R. Performance Enhancement of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Pin Type Flow Channel with Porous Inserts. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2015; 3:1–10.
- [11] Fahrudin A, Ichsani D, Taufany F. Improving PEM fuel cell performance using in-line triangular baffles in triple serpentine flow field. *The 3th Annual Applied Science and Engineering Conference*. 2018.
- [12] Peng S W, Wu H W. A three-dimensional numerical investigation of trapezoid baffles effect on non-isothermal reactant transport and cell net power in a PEMFC. *Applied Energy*. 2015; 143:81–95.
- [13] Heidary H, Kermani M J, Dabir B. Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances. *Energy Conversion and Management*. 2016; 124:51–60.
- [14] Heidary H, Kermani M J, Advani S G, Prasad A K. Experimental investigation of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016; 41:6885–6893.
- [15] Alrwashdeh S S. Neutron radiographic in operando investigation of water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells with channel barriers. *Energy Conversion and Management*. 2017; 148:604–610.
- [16] Afshari E, Mosharaf-Dehkordi M, and Rajabian H. An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor. *Energy*. 2017; 118:705–715.
- [17] Atyabi S A, Afshari E. Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 214:738-748.
- [18] Masaeli N, Afshari E, Baniasadi E, Baharlou-Houreh N. Performance studies of a membrane-based water and heat exchanger using serpentine flow channels for polymer electrolyte membrane fuel cell application. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 222:119950
- [19] Afshari E, Jazayeri S A. Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*. 2009; 194:423-432.