



سال هفتم، شماره ۲۸
پاییز ۱۳۹۵، صفحات ۶۲-۵۳

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

مروری بر مدل سازی انتقال جرم در پیل سوختی غشاء الکترولیت پلیمر

سمانه قنبرلو

گروه مهندسی شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
samanehghanbarlu87@gmail.com

عزیز باباپور

گروه مهندسی شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

سحر فلاحت پیشه

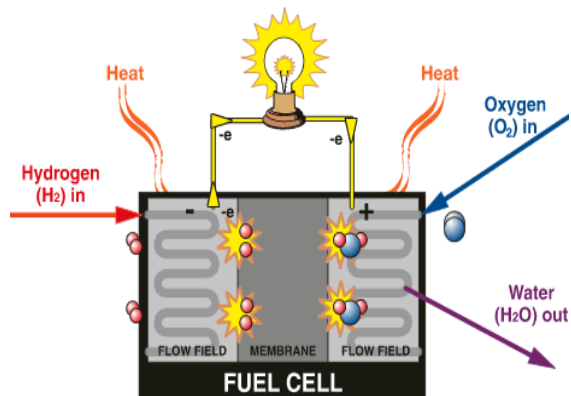
گروه مهندسی شیمی، واحد اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در بین فناوری‌های نسل بعدی، یک سلول سوختی غشاء الکترولیت پلیمری (PEMFC) تصور می‌شود که یک روش رایج برای تولید برق با دارا بودن استفاده‌ی گسترده‌ی آن در تمام برنامه‌های کاربردی در آینده‌ای نزدیک باشد. با توجه به بهره‌وری بالا و سازگاری آن با محیط زیست، این فناوری مورد علاقه‌ی مهندسين خودرو و دانشمندان می‌باشد و در نتیجه به عنوان یک گزینه‌ی امید بخش برای جایگزین موتورهای احتراق داخلی در بخش حمل و نقل محسوب می‌گردد. با این حال، چالش‌های فنی از جمله دوام، عملکرد و روش ساخت مقرون به صرفه وجود دارد که به منظور تجاری‌سازی آن نیاز به رسیدگی دارند. با در دسترس بودن کامپیوترهای قدرتمند، مدل‌سازی سلول سوختی در آزمایش‌های دهه‌ی گذشته به عنوان روش درک فیزیک داخل سلول سوختی غشاء الکترولیت پلیمری مورد علاقه واقع شده است. در این پژوهش به معرفی انواع پیل سوختی و انواع میدان جریان در داخل پیل سوختی غشاء الکترولیت پلیمری پرداخته شده است. سپس به مدل‌سازی PEMFC با جریان مارپیچ به صورت مروری پرداخته شده است.

کلیدواژه: پیل سوختی، غشاء الکترولیت پلیمری، افت فشار، مدل‌سازی، مش بندی.

کار می‌کنند. شکل (۱) یک الکترولیت غشاء پروتون را به ما نشان می‌دهد.



شکل ۱: عملکرد پیل سوختی پلیمری

برای سرعت بخشیدن به واکنش، یک کاتالیست پلوتونیومی در دو سطح غشاء الکترولیت استفاده می‌شود که این کاتالیست موجب افزایش قیمت پیل سوختی می‌شود؛ اما به دلیل جامد بودن الکترولیت پیل سوختی و هم-چنین انعطاف پذیر بودن این الکترولیت، امکان شکستن یا ترک خوردن در آن کم است و این مشخصه، پیل سوختی PEM را برای کاربردهای خانگی و کاربردهای حمل و نقلی مناسب می‌کند. در پیل سوختی نوع PEM اتم‌های هیدروژن در آند یونیزه می‌شوند و الکترون‌های آن‌ها جدا می‌شود. یون‌های هیدروژن که شامل بار مثبت هستند، به سطح غشاء خلل دار نفوذ می‌کنند و به سمت کاتد می‌روند، الکترون‌های جدا شده نمی‌توانند از این غشاء عبور کنند و از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و موجب تولید برق می‌شوند. در کاتد الکترون‌ها، پروتون‌های هیدروژن و اکسیژن موجود در هوا با هم ترکیب می‌شوند و آب را تشکیل می‌دهند. پیل سوختی PEM نیازمند هیدروژن خالص است، بنابراین باید از یک رفورمر در خارج از پیل سوختی استفاده کنیم تا احتمال به‌وجود آمدن CO و در نتیجه مسمومیت کاتالیست را کاهش دهیم.

مقدمه

در بین فناوری‌های نسل بعدی، یک سلول سوختی غشاء الکترولیت پلیمری تصور می‌شود که یک روش رایج برای تولید برق با دارا بودن استفاده‌ی گسترده‌ی آن در تمام برنامه‌های کاربردی در آینده‌ای نزدیک، باشد. با توجه به بهره‌وری بالای آن و دوستی با محیط‌زیست، این فناوری مورد علاقه‌ی مهندسين خودرو و دانشمندان می‌باشد و در نتیجه به‌عنوان یک گزینه‌ی امیدبخش برای جایگزین موتورهای احتراق داخلی در بخش حمل و نقل محسوب می‌گردد. با این حال، چالش‌های فنی از جمله دوام، عملکرد و روش ساخت مقرون به صرفه [۱-۲] وجود دارد که به منظور تجاری سازی آن نیاز به رسیدگی دارند. با در دسترس بودن کامپیوترهای قدرتمند، مدلسازی سلول سوختی PEM در آزمایش‌های دهه‌ی گذشته به عنوان روش درک فیزیک داخل سلول سوختی PEM مورد علاقه واقع شده است. طبقه‌بندی رایج پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت آن‌ها به صورت زیر می‌باشد:

- پیل سوختی پلیمری (PEMFC)
- پیل سوختی قلیایی (AFC)
- پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)
- پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC)
- پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)
- پیل سوختی متانولی (DMFC)

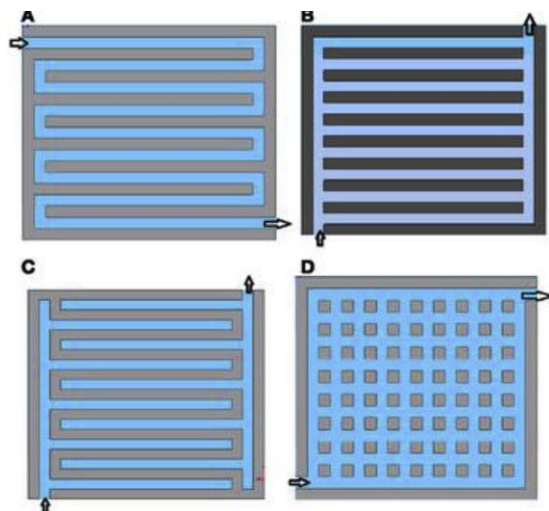
مواد و روش‌ها

-پیل سوختی غشاء پروتن (PEMFC)

پیل‌های سوختی غشاء پروتون دارای غشاء پلیمری جامد هستند که در حال حاضر عمدتاً غشاء Nafion در این پیل سوختی به کار برده می‌شود و به شکل یک ورقه باریک منعطف است. این غشاء کوچک و سبک بوده و در دمای پایین کار می‌کند. (دمای کارکرد بهینه در حدود ۸۵ درجه سلسیوس است). سایر الکترولیت‌های جامد در دمای بالا

آن‌ها باید انتقال جرم واکنش دهنده کارآمد به سطح الکترودها در افت فشار نسبتاً کم ارائه دهند.

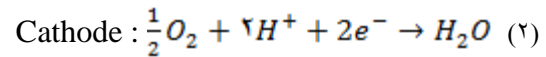
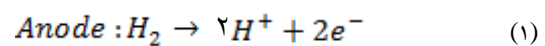
توزیع یکنواخت گازهای واکنش دهنده، در سطح فعال الکتروود منجر به کاهش غلظت اضافه ولتاژ می‌گردد [۶-۷]. علاوه بر این، توزیع مناسب میدان‌های جریان گاز، می‌تواند چگالی توان خروجی را تا ۵۰٪ افزایش دهد. از این رو، بهینه سازی میدان‌های جریان، یکی از مهم‌ترین مسائل برای بهبود عملکرد سلول‌های سوختی PEM است [۸]. انواع مختلفی از میدان‌های جریان با طراحی‌های مختلف شامل، میدان جریان مارپیچ، میدان جریان موازی، میدان جریان interdigitated، و میدان جریان نوع پین [۹] وجود دارد. شکل (۲) انواع مختلف میدان جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۲: انواع میدان جریان (A. میدان جریان مارپیچ - B. میدان جریان موازی - C. میدان جریان Interdigitated - D. میدان جریان نوع پین [۵])

Polegri و spaziant [۸]، یک طراحی میدان جریان مستقیم (شکل ۲B) انجام دادند. در این طراحی، عملکرد سلول

واکنش‌های انجام شده در آند و کاتد به شرح ذیل است:



مزایای یک پیل، راندمان بالا (در حدود ۴۳-۵۸٪)، دمای پایین [۳-۴]، شروع به کار سریع، عدم حساسیت به دی اکسیدکربن و امکان استفاده از گازهای مشتق شده از هیدروکربن به عنوان سوخت می‌باشد و از معایب آن می‌توان به حساسیت به مونواکسید کربن، به کارگیری فلزات کمیاب در ساختمان پیل و پیچیده بودن سیستم مدیریت آب در مجموعه‌ی غشاء و الکتروود اشاره کرد.

- تحقیقات عددی کانال جریان مارپیچ با اندازه‌های خم مختلف در PEMFC

صفحات دو قطبی یکی از بخش‌های کلیدی یک PEMFC (سلول سوختی غشاء الکترولیت پلیمری) هستند.

میدان‌های جریان صفحات دو قطبی، گازهای واکنش دهنده را روی سطح الکتروود توزیع می‌کنند. کانال‌های جریان باید یک طراحی مناسب برای کاهش اتلاف انتقال جرم در یک افت فشار حداقل داشته باشند. در میان کانال‌های جریان مختلف، کانال جریان مارپیچ، توجه قابل توجهی برای عملیات در داخل سلول‌های الکتروشیمیایی را به خود دریافت کرده است. در یک مطالعه، یک مدل عددی سه بعدی پیشنهاد شده است و برای مطالعه اثر اندازه‌ی خم روی سلول سوختی PEM (غشاء الکترولیت پلیمری) به کار گرفته شد [۵]. طراحی کانال‌های جریان در صفحات دو قطبی یک نقش حیاتی در عملکرد اتلاف انتقال جرم، ولتاژ خروجی از سلول سوختی، ایفا می‌کند.

تشکیل شده است. این طراحی نرخ انتقال اکسیژن و چگالی جریان محلی را افزایش می‌دهد.

Can-Andrade و همکاران [۱۶]، یک طراحی میدان جریان شعاعی برای ضخامت دو قطبی ارائه دادند. در این طرح، مقاطع عرضی مستطیلی کانال‌ها، ثابت نیست و با نزدیک تر شدن جریان گاز به خروجی کانال، افزایش می‌یابد.

Bodda و همکاران [۱۷]، یک مدل محاسباتی سه بعدی از صفحات دو قطبی با شکل‌ها، اندازه و الگوی کانال‌های جریان مارپیچ مختلف توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد که خم‌های مربع افت فشار بالای مستمر در مقایسه با خم‌های منحنی‌وار دارد. هم‌چنین، کاهش سطح مقطع منجر به توزیع یکنواخت‌تر واکنش دهنده‌ی گازی در سطح الکترود، می‌شود. اما آن منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. همان‌طور که می‌توان به وضوح دید، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌تواند امکان بررسی پدیده الکتروشیمیایی و انتقال در سلول سوختی PEM را فراهم کند. در میان انواع مختلف طراحی‌های میدان جریان، میدان جریان مارپیچ اغلب برای سلول‌های سوختی PEM استفاده می‌شود. در کانال‌های جریان مارپیچ، جریان ثانویه و جدایی جریان در سمت‌های درونی خم‌ها تشکیل می‌شود، از این رو افت فشار در امتداد کانال را افزایش می‌دهد. کاهش افت فشار در کانال‌های جریان منجر به توزیع یکنواخت‌تری از واکنش دهنده‌های گازی که به نفع انتقال گرما، جرم، کنترل دما و اتلاف انتقال جرم پایین می‌شود [۱۷-۱۹]. دامنه‌ی محاسباتی در مطالعه دیگر، به یک دور از کانال مارپیچ، محدود است. مدل سه بعدی کانال مارپیچ در سلول سوختی PEM شامل نه منطقه از جمله آند و کاتد جمع آوری کننده، کانال گازی آند و کاتد، لایه‌ی نفوذ گازی کاتد و آند، لایه کاتالیستی کاتد و آند و غشاء است. کانال‌های مارپیچ با اندازه‌های مختلف خم (اندازه خم ۰/۸ mm - اندازه خم ۱mm - اندازه خم ۱/۲mm) بررسی شده است [۵].

مربوط به سلول سوختی، به علت زه‌کشی آب ناکافی و توزیع جریان گاز غیر یکنواخت در سمت کاتد، کاهش می‌یابد.

Kazim و همکاران [۱۰] یک مدل ساده‌ی دو بعدی از سلول‌های سوختی PEM با میدان‌های جریان موازی و interdigitated (شکل ۲D) را توسعه دادند. میدان جریان interdigitated یک چگالی توان بالاتر از میدان جریان موازی دارد.

Zuliani و Teccani [۱۱] اطلاعات تجربی برای سلول سوختی با میدان جریان موازی و مارپیچ (شکل ۲A)، به منظور بررسی اثر میدان جریان روی عملکرد سلول سوختی ارائه دادند.

نتایج به دست آمده نشان داد که هر سه با تعداد بیش‌تر از گام مارپیچ، بهترین عملکرد را از نظر چگالی توان دارد، با این حال آن باعث افت فشار بالاتری در سرتاسر سلول می‌گردد. Dutt و همکارانش [۱۲]، یک شبیه‌سازی عددی از مدل سه بعدی از سلول سوختی PEM با کانال جریان گازی مارپیچ توسعه دادند تا جریان جرمی بین کانال‌ها را پیش‌بینی کنند. نتایج نشان دادند که توزیع جریان به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر الگوهای مصرف جرمی روی مجمع غشاء الکترود هستند.

Reddy و Kumar [۱۳]، یک مدل سه بعدی از سلول سوختی PEM متشکل از کانال جریان مارپیچ استفاده کردند. نتایج نشان دادند که کاهش عرض زمین منجر به افزایش مصرف هیدروژن در آند، در نتیجه بهبود عملکرد سلول سوختی می‌شود. Manso و همکاران [۱۴]، تأثیر نسبت ارتفاع/عرض کانال جریان مارپیچ روی عملکرد سلول سوختی PEM بررسی کردند. در ولتاژ عملیاتی بالا، این نسبت افزایش می‌یابد، جریان و درجه‌ی حرارت به‌طور یکنواخت توزیع و عملکرد سلول بهبود می‌یابد. wang و همکاران [۱۵]، هندسه مارپیچ را در سمت کاتد ارائه دادند که از سه کانال مخروطی و یک کانال واگرای نهایی

که k^{eff} رسانش گرمایی موثر در محیط متخلخل، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$k^{eff} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) k_s \quad (9)$$

که k_f و k_s به ترتیب رسانایی مایع و جامد در محیط متخلخل هستند. در معادله انرژی، S_h منبع گرما است که می تواند توسط معادله زیر تخمین زده شود:

$$S_h = h_{phase} + h_{reaction} + R_{ohm} I^2 \quad (10)$$

h_{phase} تغییر آنتالپی به دلیل تراکم / تبخیر بخار است که در این مدل در نظر گرفته نشده است.

واکنش های الکتروشیمیایی در لایه های کاتالیست اتفاق می افتد. فعال سازی سطح اضافه پتانسیل، نیروی محرکه ی واکنش شیمیایی است. هدایت غشاء، تابعی از محتوای آبی غشاء، است، و توسط مرجع [۲۱] برآورده شده است. در نهایت پتانسیل مدار باز به معادله ی زیر کاهش یافت [۲۲].

$$V_{oc} = 0.2329 + 0.0025 * T \quad (11)$$

در چگالی جریان کم، نتایج حاصل از روش عددی با توجه به داده های تجربی، رضایت بخش است. نتایج حاصل از کانال ماریچ با اندازه خم مربعی ۱/۲mm حداقل تفاوت را با نتایج تجربی نشان داد. در چگالی های جریان بالا، منحنی تقریباً به صورت خطی است و نتایج حاصل از شبیه سازی، مقدار بالاتری در مقایسه با داده های تجربی دارد. تفاوت از در نظر گرفتن مدل تک فاز و انتقال کل آب تولیدی به صورت بخار ناشی می شود. تجمع آب مایع منجر به اشغال کاتالیزور، منافذ لایه نفوذ گاز (GDL) می شود که باعث مقاومت در مقابل انتقال جرم از واکنش دهنده ها و پس از آن کاهش در عملکرد سلول سوختی می شود. این اثر در

- معادله پیوستگی

به طور کلی، معادله ی بقای جرم به صورت زیر ارائه می شود:

$$\nabla \cdot (\rho \varepsilon U) = S_{mass} \quad (3)$$

که U بردار سرعت گونه ها و S_{mass} ترم منبع جرم است. ترم منبع در کانال گاز، لایه ی نفوذ گاز و غشاء، صفر فرض می شود. ترم منبع در لایه کاتالیست به دلیل آن که انجام واکنش های شیمیایی در این منطقه، صفر نیست. نرخ مصرف جرم هیدروژن و اکسیژن به ازای واحد حجم توسط مراجع داده شده است [۱۹-۲۰].

$$S_{H_2} = -\frac{M_{H_2}}{2F} i_a \quad (4)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{O_2}}{2F} i_c \quad (5)$$

نرخ جرم تولیدی به ازای هر واحد حجم توسط معادله ی زیر داده شده است:

$$S_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{2F} i_c \quad (6)$$

- معادله مومنتوم

در محیط متخلخل، مانند لایه ی نفوذ و غشاء معادله مومنتوم به شکل زیر می تواند نوشته شود:

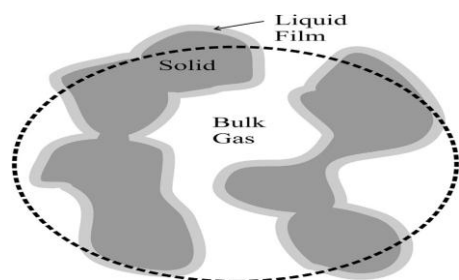
$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \bar{u} \cdot \bar{u}) = -\nabla \varepsilon p + \nabla \varepsilon \tau + S_{mom} \quad (7)$$

که به ترتیب ε و τ و S_{mom} به ترتیب تخلخل، تانسور برشی، ترم منبع مومنتوم است.

- معادله انرژی

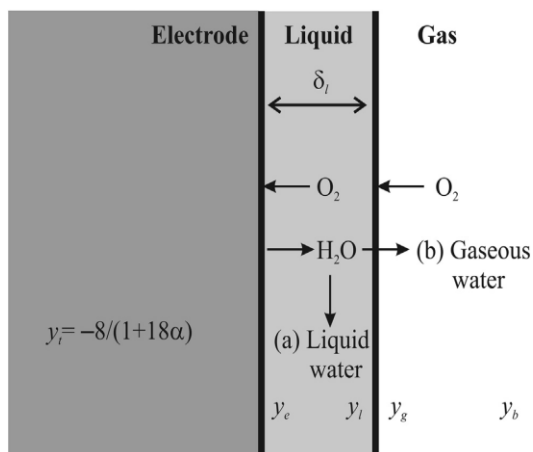
معادله انرژی می تواند به صورت رابطه ی (۸) نوشته شود:

$$\nabla \cdot (\rho_i \bar{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \cdot \nabla T) + S_h \quad (8)$$



شکل ۳: شماتیک محیط متخلخل [۲۶]

فرض شده است که کاتد در قالب یک محیط متخلخل است و این که مواد الکتروود جامد توسط یک مایع احاطه شده است و یا مایع مانند، فیلم Water/Nafion، از طریق آن اکسیژن منتقل می‌شود. برای انتقال جرم در محیط متخلخل، رایج است که روش‌های حجم متوسط به کار گرفته شوند، و شکل (۴) شماتیک متوسط مقادیر توده، دیوار و مقادیر سطحی کسر جرمی را که به عنوان محلی $D-1$ برای اهداف تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۴: حجم متوسط مقادیر توده، دیوار و مقادیر سطحی کسر جرمی

چگالی‌های جریان بالا قابل توجه است که حضور آب و جاری شدن در سمت کاتدی، انتقال اکسیژن را کاهش می‌دهد. این اثر در مدل تک فاز در نظر گرفته نشده است، در نتیجه منجر به چگالی جریان در امتداد کانال گاز می‌شود. علاوه بر این، خشک کردن آند یک عامل عمده‌ای است که ولتاژ در چگالی جریان بالا را کاهش می‌دهد [۲۴-۲۳-۴].

یافته‌ها و بحث

- افت فشار

افت فشار یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی طراحی در کانال‌های جریان سلول سوختی است. همراه با جهت جریان (از ورودی و خروجی) افت فشار باید کاهش یابد، در غیر این صورت، افت فشار معکوس، در کانال‌ها جای می‌گیرد، باعث می‌شود که جریان‌های ثانویه در نزدیکی دیوارهای داخلی ایجاد شود. در کانال‌های مارپیچ، جریان‌های ثانویه در نزدیکی دیوارهای داخلی تشکیل می‌شود. این باعث تلفات اضافی در کانال‌ها می‌شود. یک افزایش در اندازه‌های خم مربع منجر به کاهش در جریان‌های ثانویه می‌شود [۲۵]. جدول (۱) فشارهای دینامیکی و کلی در کانال‌های جریان مارپیچ با اندازه خم متفاوت را نشان می‌دهد. در یک کانال مارپیچ با اندازه‌ی خم مربعی $1/2\text{mm}$ ، افت فشار تا $31/2\%$ و $90/6\%$ به ترتیب در مقایسه با 1mm و $0/8\text{mm}$ کاهش یافت [۵].

- فرمولاسیون انتقال جرم برای کاتد PEMFC

محاسبات عملکرد کاتد یک سلول سوختی غشاء الکترولیت پلیمر معمولی برای مورد ایده‌آل که در شکل (۳) نشان داده شده است انجام گرفت.

جدول ۱- مقایسه ی فشار در سه نوع کانال مارپیچ [۵]

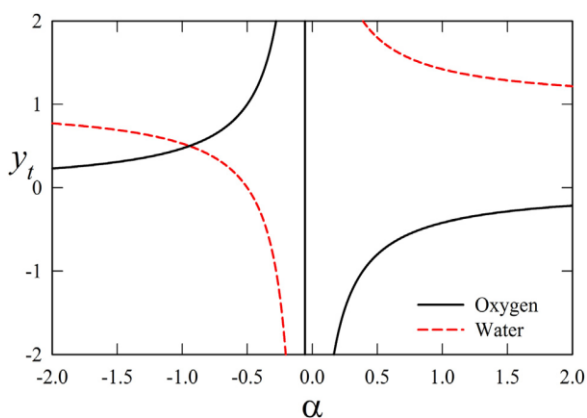
اندازه ی خم (mm)	فشار کلی (Pa)	فشار دینامیکی (Pa)
۰/۸	۷۷۸۲	۱۱۰۵
۱	۵۳۶۰	۷۰۳
۱/۲	۴۰۸۹	۴۷۰

$$\begin{aligned}
 m' &= (m'_{H_2} + m'_{H_2O})_{anode} \\
 &= (m'_{O_2} + m'_{H_2O})_{cathode} \quad (13) \\
 &= (4 + 4\alpha * 18)kg \\
 &= -32kg + 2(1 + 2\alpha)18kg
 \end{aligned}$$

مقدار حالت-T (مفهوم انتقال-مصرف) برای فاز اکسیژن به صورت زیر تعریف شده است:

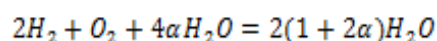
$$y_t = m'_{O_2} / m' \quad (14)$$

به طوری که $y_t = -8(1 + 18\alpha)$ در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: مقادیر انتقال پایدار اکسیژن و آب به عنوان تابعی از ضریب درآگ α [۲۶]

واکنش کلی در مجمع الکتروود به صورت زیر است



که α ضریب درآگ، تعداد خالص مولکول های آب در هر پروتن در کاتد: در یک PEMFC، نیروهای مولکول های آب و درآگ از طریق غشاء با هر پروتن می باشد.

درآگ الکترواسموتیک توسط نفوذ بازگشتی از کاتد به آند، و همچنین توسط شار جابجایی در صورت وجود یک گرادیان فشار بین دو الکتروود، برای دادن یک مقدار خالص، معمولاً کم تر از ۱، اصلاح شده است [۲۶]. Dai [۲۷] و همکارانش مقادیر تجربی تعیین شده و نتایج محاسبات از مدل های ریاضی برای تعادل آب در مجمع الکتروود غشاء و محدوده های فعلی مقدار هردو α و n_p را بررسی کردند. موازنه ی جرم توسط رابطه ی ۱۳ نوشته می شود:

در مطالعه‌ای، اثر مش محاسباتی در هر جهت بر روی دقت راه حل در یک روش نظام‌مند بررسی شده است. مشخص شده است که مش در جهات مختلف دارای درجه‌های مختلف تأثیر روی راه حل است که یک جهت می‌تواند درشت‌تر از دیگری باشد. روش مش مذکور قادر است که تا حد زیادی، تعداد عناصر مش را کاهش دهد، از این رو زمان محاسبه در عین حفظ ویژگی‌های متغیرهای مهم میدان جریان کاهش دهد. علاوه بر این، قابل اجرا برای طیف وسیعی از اندازه‌های سلول و تنظیمات میدان جریان می‌باشد و باید به عنوان یک راهنما برای نسل مورد استفاده قرار گیرد [۲۹]. اولین مدل سه بعدی در کار Dutta و همکارانش توسعه یافت [۳۰].

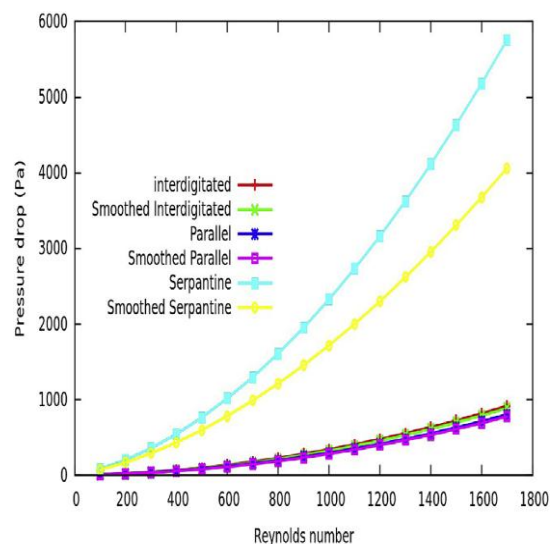
در مدل آن‌ها، یک کد CFD تجاری برای حل برای میدان جریان در یک سلول تک کانال، مورد استفاده قرار گرفت. سینک تعریف شده و شرایط منبع توسط کاربر به ترتیب برای مصرف گونه‌ها و تولید به دلیل واکنش الکتروشیمیایی استفاده شد. در نتیجه، این استفاده از CFD را به عنوان یک ابزار عمده برای بررسی یک سلول سوختی PEM در بسیاری جنبه‌ها موجب گردید.

از دیدگاه اعتبارسنجی یک مدل، gu و wang [۳۱] نشان دادند که دو سلول کاملاً متفاوت تحت شرایط عملیاتی یکسان می‌توانند دقیقاً چگالی متوسط جریان یکسانی با تنظیم دو پارامتر اساسی، چگالی جریان تبادل واکنش کاهش اکسیژن و مقاومت یونی در لایه‌های کاتالیزور بدهند. آن‌ها سپس نتیجه دارند که یک منحنی قطبی برای اطمینان از دقت نتایج پیش بینی شده کافی نیست و استفاده از توزیع محلی متغیرهای میدان جریان را تأکید کردند. Arvay و همکارانش [۳۲] اقدام به ایجاد معیارهای همگرایی برای یک مدل CFD سلول سوختی PEM نمودند. آن‌ها پیشنهاد کردند که ثبات و یکنواختی متغیرهای مهم باید در کنار طرح باقی‌مانده، در قضاومت همگرایی استفاده گردد و متوجه شدند که حداقل ۱۵ هزار تکرار

حالت T-مربوط به آب، فقط ۱-۲٪ است. انتقال جرم اکسیژن به‌طور کلی به عنوان یک عامل مهم و بالقوه‌ی محدود کننده‌ی سرعت عملیات PEMFC در نظر گرفته شده است [۲۶].

- تأثیر بستر آندی و افت فشار برای اعداد رینولدز مختلف با میدان جریان مختلف

سلول‌های سوخت حاوی ده‌ها یا حتی صدها کانال توزیع جریان سوخت بر روی سطح سلول هستند. اندازه و الگوی کانال‌های جریان به‌طور قابل توجهی می‌تواند عملکرد سلول را تحت تأثیر قرار دهد. اگر چه طیف گسترده‌ای از الگوهای جریان به کار برده می‌شوند، گروه‌های تحقیقاتی و توسعه دهندگان، برخی از آن‌ها را بررسی کرده‌اند. طی بررسی‌های انجام گرفته، سلول سوختی با مساحت بزرگ‌تر، طراحی ماریچ افت فشار بیش‌تری را ایجاد خواهد کرد [۲۸]. در شکل (۶) نتایج بررسی افت فشار در مقابل رینولدز برای انواع میدان جریان نشان داده شده‌اند.



شکل ۶: مقایسه‌ی افت فشار در مقابل رینولدز برای انواع میدان جریان [۲۸]

-یک راهبرد مؤثر مش بندی برای مدل‌سازی CFD یک PEMFC

- محور X به جهت عرضی (جانبی) اشاره می کند.
- محور Y به جهت در طول کانال (جهت جریان محوری) اشاره می کند.

- محور Z به جهت ارتفاع (ضخامت سلول) بر می گردد.
معادلات حاکم مورد استفاده در این مطالعه آنهایی هستند که در نشریات قبلی شرح داده شده اند [۳۹-۴۱].
مسئله در یک کد CFD تجاری به صورت عددی حل شده است، ANSYS Fluent با یک سلول سوختی PEM اضافه کردن ماژول، با استفاده از الگوریتم ساده است.

یک مایناتور نقطه از متغیرهای مهم همراه با حفاظت از جرم برای گونه های واکنش دهنده علاوه بر طرح باقی مانده ها حکم می شود تا یک راه حل کامل همگرا بررسی گردد.
مدل CFD سه بعدی از یک سلول سوختی PEM استفاده می شود تا به طور سیستماتیک اثر مش در هر جهت را روی دقت راه حل، بررسی کند. چنین اثری در هر جهت به شرح زیر خلاصه شده است.

- مش در جهت Z (ضخامت سلول)، دارای قوی ترین اثر روی دقت راه حل، به ویژه آن متغیرهای انتقال الکترون مرتبط، به رغم حداقل بعد سلول در این جهت، می باشد.

- مش جانبی (محور X)، مسئول حل لایه ی مرزی در دیواره های کانال است و اثر amoderate روی محلول دارد و از این رو عناصر نزدیک به دیوار کافی باید همیشه استفاده شود.

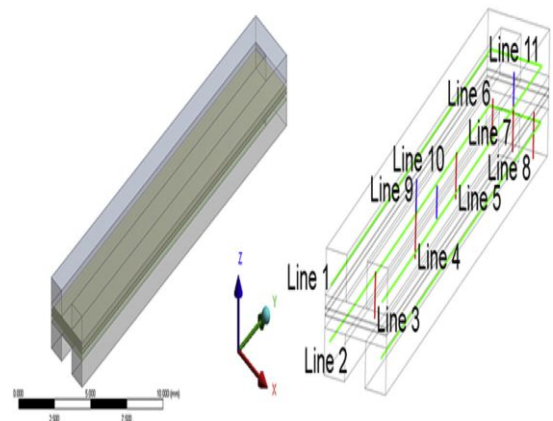
- مش محوری دارای کم ترین اثر بر روی حل دارد که یک مزیت بزرگ از نقطه نظر محاسباتی ارائه می دهد.

مش در این جهت، می تواند با حداقل دقت حل آرام شود.
در نهایت، استفاده از استراتژی می باشد مش پیشنهاد شده تأیید شده است. این ثابت می کند که قادر به کاهش قابل

مورد نیاز است. عمومیت معیارهای پیشنهادی، هنوز مورد تردید است.

بررسی مدل سازی سلول سوختی PEM نشان می دهد که مدل های سه بعدی معمولی برای تک کانال حداقل شامل ۱۰^۴ عناصر سلولی است [۳۳-۳۴] و این می تواند توسط بسیاری از لایه ها اگر بیش از یک کانال را شامل شود، افزایش برای یک سلول مقیاس آزمایشگاهی، منطقه فعال بین ۲۵ تا ۱۰۰ است که تعداد عناصر به راحتی می تواند به ۱۰^۶ برسد [۳۱-۳۵-۳۸].

Yang و Choopanya یک بخش نماینده ی یک میدان جریان تک مارپیچ متشکل از دو کانال مستقیم متصل شده توسط یک خم ۱۸۰ درجه را در نظر گرفتند. دامنه ی محاسباتی شامل کانال های جریان کاتد و آند، لایه های نفوذ گاز (GDLS)، لایه های کاتالیست (CLS) و یک غشاء الکترولیت پلیمری PEM همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، می باشد.



شکل ۷: کانال با خم منحنی وار ۱۸۰ درجه [۲۹]

کنوانسیون جهت براساس دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر تعریف شده است؛

[10] Kazim, A., Liu, HT., Forges, P., 1999, Modelling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields. *J Appl Electrochem*;29: 1409-1416.

[11] Taccani, R., Zuliani, Nicola., 2011, Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: experimental analysis. *Int J Hydrogen Energy*;36:10282-10287.

[12] Dutta, S., Shimpalee, S., Van Zee, JW., 2001, Numerical prediction of mass exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell. *Int J Heat Mass Transf*;44:2029-2042.

[13] Kumar, A., Reddy, RG., 2003, Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. *J Power Sources*;113:11e8.

[14] Manso, AP., Marzo, FF., Garmendia Mujika, M., Barranco, J., 2011, Lorenzo A. Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design. *Int J Hydrogen Energy*;36:6795-6808.

[15] Wang, X., Huang, Y., Cheng, Ch., Jang, J., Lee, D., Yan, W., 2010, et al. An inverse geometry design problem for optimization of single serpentine flow field of PEM fuel cell. *Int J Hydrogen Energy*;35:4247-4257.

[16] Cano-Andrade, S., Hernandez-Guerrero, A., von Spakovsky, MR., Damian-Ascencio, CE., Rubio-Arana, JC., 2010, Current density and polarization curves for radial flow field patterns applied to PEMFCs (proton exchange membrane fuel cells). *Energy*;35:920-927.

[17] Boddu, R., Kumar Marupakula, U., Summers, B., Majumdar, P., 2009, Development of bipolar plates with different flow channel configurations for fuel cells. *J Power Sources*;189:1083-1092.

[18] Liu, H., Li, P., Van Lew, J., 2010, CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels. *Int J Hydrogen Energy*;35:9186-9198.

[19] Bernadi, DM., Verbrugge, MW., 1992, A mathematical model of the solid polymer electrolyte fuel cell. *J Electrochem Soc*;139:2477-2491.

[20] Gurau, V., Liu, H., Kakac, S., 1998, Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells. *AIChE*;44:2410-2422.

[21] Xing, L., Liu, X., Alaje, T., Kumar, R., Mamlouk, M., Scott, K., 2014, A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell. *Energy*;73:618-634.

[22] Parthasarathy, A., Srinivasan, S., Appleby, AJ., 1992, Temperature dependence of the electrode kinetics of oxygen reduction at the platinum/nafiion interface-a microelectrode investigation. *J Electrochem Soc*;139:2530-2537.

[23] Hashemi, F., Rowshanzamir, S., Rezakazemi, M., 2012, CFD simulation of PEM fuel cell performance: effect of straight and serpentine flow fields. *J Math Comput Model*;55:1540-1557.

[24] Abdollahzadeh, M., Pascoa, JC., Ranjbar, AA., Esmaili, Q., 2014, Analysis of PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell cathode two-dimensional modeling. *Energy*;68:478-494.

[25] Rostami, L., Rahimi, R., Gholynejad, P., 2015, Design of bipolar plates with different serpentine flow channel configurations. *Fuel cells WILEY-VCH*. [under review].

[26] Steven, B., 2015, Beale. Mass transfer formulation for polymer electrolyte membrane fuel cell cathode. *International journal of hydrogen energy* 40, 11641-11650.

[27] Dai, W., Wang, H., Yuan, X-Z., Martin, JJ., Yang, D., Qiao, J., 2009, et al. A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells. *Int J Hydrog Energy*;34(23): 9461-9478.

[28] Karvelas, E.G., Koubogiannis, D.G., HatziaPOSTOLOU, A., I.E. Sarris, I.E., 2016, The effect of anode bed geometry on the hydraulic behaviour of PEM fuel cells. *Renewable Energy* 93, 269-279.

توجهی در زمان محاسباتی می‌باشد، در حالی که سطح قابل قبولی از دقت برای طیف گسترده‌ای از اندازه‌های سلول و تنظیمات میدان جریان تحت شرایط عملیاتی معمولی را می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک راهنما در فرآیند مش‌بندی برای آن‌هایی که در مدل‌سازی CFD مربوط به PEM جدید هستند، استفاده شود [۲۹].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مروری، انواع پیل‌های سوختی معرفی گردید و پیل سوختی غشاء الکترولیت پلیمری با اندازه خم‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عمده به شرح خلاصه می‌شود:

۱- یکنواخت‌ترین توزیع برای اندازه خم ۱/۲mm

۲- بالاترین افت فشار برای میدان جریان موازی

۳- کاهش چگالی جریان با افزایش ضریب دراگ

۴- مش در جهت Z دارای قوی‌ترین اثر روی دقت حل

۵- کاهش زمان محاسباتی توسط مش راهنما

منابع

- [1] Wang, Y., Chen, KS., Mishler, J., Cho, SC., Adroher, XC., 2011, A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research. *Appl Energy*, 88(4): 981-1007.
- [2] Martin, KE., Kopasz, JP., McMurphy, KW., 2010, Status of fuel cells and the challenges facing fuel cell technology today. In: *ACS Symp. Ser.*, vol. 1040; p. 1-13.
- [3] Siegel, C., 2008, Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells. *Energy*;33:1331-1352.
- [4] Thanh Nguyen, Ph., Berning, T., Djilali, N., 2004, Computational model of a PEM fuel cell with serpentine gas flow channels. *J Power Sources*;130:149-157.
- [5] Rostami, L., Mohamad Gholy Nejad, P., Vatani, A., 2016, A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energy* 97, 400-410.
- [6] Zi Yuan, X., Wang, H., Zhang, J., 2005, Wilkinson DP. Bipolar plates for PEM fuel cells e from materials to processing. *J New Mater Electrochem Syst*;8:257-267.
- [7] Middelma, E., Kout, W., Vogelaar, B., Lenssen, J., 2003, de Waal E. Bipolar plates for PEM fuel cells. *J Power Source*;118:44-46.
- [8] Li, X., Sabir, I., 2005, Review of bipolar plates in PEM fuel cells: flow-field designs. *Int J Hydrogen Energy*;30:359-371.
- [9] Liu, H., Li, P., Juarez-Robles, D., Wang, K., Hernandez-Guerrero, A., 2014, Experimental study and comparison of various designs of gas flow fields to PEM fuel cells and cell stack performance. *J Energy Res*;22.

- performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells. *Int J Hydrogen Energy*;37(1):436-448.
- [37] Jang, S., Shin, G., Hwang, H., Choi, K., Kim, H., 2011, Numerical studies of PEM fuel cell with serpentine flow field for sustainable energy use. In: *World Renewable Energy Congress*; p. 1205-1210.
- [38] Sinha, PK., Wang, C-Y., Beuscher, U., 2007, Transport phenomena in elevated temperature PEM fuel cells. *J Electrochem*;154(1):B106-116.
- [39] Choopanya, P., Yang, Z., 2014, Transient performance investigation of different flow-field designs of automotive polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using computational fluid dynamics (CFD). In: *10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 14th-16th July*; p. 583-592.
- [40] Choopanya, P., Peng, Z., 2012, An investigation on steady-state performance of conventional and serpentine flow-fields for automotive polymer electrolyte membrane fuel cell. In: *1st SCODECE Internal Conference (2012 International Forum on Vehicle Control)*; p. 59.
- [41] Choopanya, P., Yang, Z., 2015, A CFD investigation of effects of flowfield geometry on transient performance of an automotive polymer electrolyte membrane fuel cell. *Comput Therm Sci Int*;7(2):93-104.
- [29] Choopanya, P., Yang, Z., 2016, An effective mesh strategy for CFD modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells. *international journal of hydrogen energy* 41 , 6445-6456.
- [30] Dutta, S., Shimpalee, S., Van Zee, JW., 2000, Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells. *J Appl Electrochem*;30:135-146.
- [31] Ju, H., Wang, C-Y., 2004, Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data. *J Electrochem Soc*;151:A1954-1960.
- [32] Arvay, A., Ahmed, A., Peng, X-H., Kannan, AM., 2012, Convergence criteria establishment for 3D simulation of proton exchange membrane fuel cell. *Int J Hydrogen Energy*;37(3):2482-2489.
- [33] Wang, Y., Basu, S., Wang, C-Y., 2008, Modeling two-phase flow in PEM fuel cell channels. *J Power Sources*;179:603-617.
- [34] Dawes, JE., Hanspal, NS., Family, OA., Turan, A., 2009, Threedimensional CFD modelling of PEM fuel cells: an investigation into the effects of water flooding. *Chem Eng Sci*;64:2781-2794.
- [35] Shimpalee, S., Lilavivat, V., Van Zee, JW., McCrabb, H., Lozano- Morales, A., 2011, Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs. *Int J Hydrogen Energy*;36(19):12512-12523.
- [36] Ramos-Alvarado, B., Hernandez-Guerrero, A., Juarez-Robles, D., Li, P., 2012, Numerical investigation of the