

شبیه‌سازی، ساخت و آزمایش پیل سوختی غشای پلیمری با صفحات انتهایی شفاف

محمد رضا هاشمی نسب، محمد جعفر کرمانی^{*}، سید سلمان نورآذر، محمد حسن خودسیانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۱

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:

پیل سوختی غشاء پلیمری

طراحی و ساخت

مدیریت آب

دینامیک سیالات محاسباتی

پردازش تصویر دیجیتال

خلاصه: در این پژوهش، مراحل طراحی و ساخت یک دستگاه پیل سوختی غشای پلیمری شفاف با هدف فراهم‌ساختن امکان مشاهده مستقیم پدیده طغیان در کانال‌های جریان دو سمت آند و کاتد شرح داده شده‌است. در طراحی پیل ابتدا چالش‌های پیش‌روی ساخت شناسایی و در ادامه پیل طراحی شده شبیه‌سازی گردیده‌است. در گام نخست طراحی، ضمن بیان ضوابط و محدودیت‌های تکنیکی ساخت این دسته از پیل‌های سوختی، راهکارهای اجرایی در راستای غلبه بر این چالش‌ها ارائه و بر مبنای آن‌ها جنس و پارامترهای ابعادی کلیه قطعات تعیین گردیده‌است. در مرحله دوم طراحی، عملکرد پیل بصورت پایا و دوفازی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی و منحنی قطبیت استخراج شده‌است. در ادامه و در مرحله راه‌اندازی، گشتاور پیچشی پیچ‌ها به کمک منحنی قطبیت بهینه‌سازی شده‌است. نتایج حاصل بیانگر مقدار گشتاور پیچشی بهینه برابر ۱ برای هر پیچ در پیل ساخته شده می‌باشد. در ادامه به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، در شرایط عملیاتی مشابه، نمودار قطبیت آن با نمودار قطبیت پیل ساخته‌شده مورد مقایسه قرار گرفت. خطای ۶/۸۷٪ این مقایسه نشان‌دهنده دقت مناسب روش عددی است. در انتها نیز از کانال‌های جریان سمت کاتد عکس‌برداری صورت پذیرفت و با استفاده از روش پردازش تصویر، آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان شناسایی گردید.

۱- مقدمه

سمت آند و کاهش اکسیژن در سمت کاتد است. آب در فاز مایع و یا بخار بعنوان فرآورده جانبی واکنش الکتروشیمیایی در پیل سوختی تولید می‌شود. همچنین چگالش گازهای واکنش‌دهنده در اجزای مختلف پیل نیز سبب تشکیل قطرات آب مایع درون لایه کاتالیست، لایه نفوذ گازی و یا کانال‌های جریان می‌گردد. با وجود اینکه رسانایی یونی غشا تابع محتوای آب آن است و حضور آب در پیل‌های سوختی غشاپلیمری به منظور تأمین رطوبت غشا امری ضروری می‌باشد، انباشت بیش از اندازه آب مایع درون پیل سوختی انسداد منافذ لایه نفوذ گازی و لایه کاتالیست را در پی دارد و سبب کاهش قابل ملاحظه انتقال واکنش‌دهنده‌ها به محل انجام واکنش و خروج محصولات واکنش از پیل می‌گردد. بنابراین توزیع

امروزه انواع مختلف پیل‌های سوختی بعنوان ابزار نوین تولید توان مورد توجه صنایع مختلف قرار گرفته‌اند. در این میان پیل‌های سوختی غشای پلیمری بدلیل چگالی توان تولیدی بالا، راندمان بیش‌تر نسبت به موتورهای احتراق داخلی، عدم وجود قطعات متحرک و در نتیجه آن عدم تولید آلودگی صوتی و قابلیت عملکرد در دمای کم‌تر از $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۰ توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. یک مونسول پیل سوختی از غشای پلیمری، لایه نفوذ گازی، لایه کاتالیست و صفحات دوقطبی ساخته شده است. به‌طور کلی واکنش‌هایی که در پیل‌های سوختی غشای پلیمری اتفاق می‌افتد شامل واکنش اکسایش هیدروژن در

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mkermani@aut.ac.ir



واکنش دهنده‌ها بر روی لایه کاتالیست غیریکنواخت و در نتیجه آن جریان تولیدی غیریکنواخت می‌شود و عملکرد پیل کاهش می‌یابد [۱]. در مطالعات پیل‌های سوختی غشای پلیمری این پدیده را طغیان می‌نامند. در تقابل با پدیده‌های طغیان و خشک‌شدگی پیل‌های سوختی غشای پلیمری، مفهوم کاربردی دیگری به نام مدیریت آب تعریف می‌شود. در واقع مدیریت آب را می‌توان تلاش برای دستیابی به شرایط کارکردی بهینه به منظور جلوگیری از خشک‌شدن و یا وقوع پدیده طغیان درون پیل دانست. مدیریت آب به دلیل تأثیری که بر عملکرد و طول عمر پیل دارد بخش زیادی از مطالعات عددی [۲-۴] و آزمایشگاهی [۵-۹] در حوزه پیل‌های سوختی غشای پلیمری را به خود اختصاص داده است.

طغیان در پیل سوختی غشای پلیمری می‌تواند در هر سه ناحیه لایه کاتالیست، نفوذ گازی و کانال جریان به وقوع بپیوندد. در کانال‌های جریان مطالعه پدیده‌های دوفازی و طغیان با استفاده از روش‌های عکس‌برداری مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌پذیرد. عکس‌برداری مستقیم از پیل شفاف^۱، عکس‌برداری نوترونی^۲، عکس‌برداری توسط اشعه ایکس^۳ و رزونانس مغناطیسی هسته‌ای^۴ عمده روش‌های به کار رفته در حوزه عکس‌برداری مستقیم‌اند حال آن‌که در روش‌های غیرمستقیم به‌صورت آزمایشگاهی پارامترهای قابل اندازه‌گیری نظیر افت فشار و مقاومت فرکانس بالا^۵ به‌منظور مطالعه دوفازی پیل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از میان روش‌های مذکور سیستم‌های عکس‌برداری اپتیکال علاوه بر کاربرد آسان و هزینه کم، قابلیت ارائه تصاویر با حداکثر وضوح ۲۰۰ نانومتر را دارند. عیب این روش را می‌توان در نیاز به استفاده از صفحات انتهایی شفاف و تعبیه کانال‌های جریان بر روی صفحات فلزی به جای گرافیت به‌منظور مشاهده تشکیل و یا انباشت قطرات آب در کانال‌های جریان دانست که این امر در پیل‌های سوختی تجاری رایج نمی‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که به‌طورمعمول در پیل‌های تجاری الگوی جریان بر روی صفحات گرافیتی طراحی می‌گردد و جنس صفحات انتهایی از آلومینیوم است.

سرجی و همکاران [۵] روش عکس‌برداری مستقیم را به‌منظور

مطالعه جریان دوفازی در کانال‌های جریان پیل سوختی غشای پلیمری به هنگام استفاده از انواع مختلف لایه نفوذ گازی به کار بردند. آن‌ها در طراحی پیل خود ضمن ماشین‌کاری کانال‌های جریان با الگوی موازی بر روی صفحات مسی، از صفحات پلی کربنات شفاف بعنوان صفحات انتهایی استفاده کردند. همچنین دو دوربین سرعت بالا برای مشاهده انباشت آب در روبروی کانال‌های جریان سمت آند و کاتد تعبیه گردید و الگوریتم‌های پردازش تصویر و ویدئو به منظور تشخیص توده‌های آب مورد استفاده قرار گرفت. اسپرنیاک و همکارانش [۱۰] تأثیر استفاده از لایه نفوذ گازی مختلف بر انتقال آب در پیل سوختی غشای پلیمری با الگوی مارپیچ تک‌راهه را با استفاده از روش عکس‌برداری مستقیم مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور آن‌ها نسبت به طراحی و ساخت یک پیل سوختی غشای پلیمری شفاف اقدام نمودند. در سمت کاتد این پیل، صفحات استیل ضدزنگ و پلی کربنات شفاف برای جمع‌کننده جریان و صفحه انتهایی به کار گرفته شد. در حالیکه طراحی انجام‌گرفته در سمت کاتد شبیه پیل‌های تجاری رایج بود. ژان و همکارانش [۱۱] به مطالعه مدیریت آب در پیل سوختی غشای پلیمری با الگوی مارپیچ چند راهه به کمک دوربین سرعت بالا پرداختند. آن‌ها از صفحات مسی و پلاستیک فشرده به‌ترتیب برای جمع‌کننده جریان و صفحه انتهایی استفاده کردند در این پژوهش نیز طراحی انجام‌گرفته در سمت کاتد مشابه نمونه‌های تجاری رایج بود. بزرگ‌نژاد و همکارانش [۹] به منظور بررسی پارامتری تأثیر شرایط عملکردی بر جریان دوفازی در کانال‌های جریان سمت کاتد از تکنیک عکس‌برداری مستقیم به‌کمک دوربین با وضوح مکانی بالا استفاده کردند. بدین منظور آن‌ها پیل سوختی شفاف با الگوی جریان مارپیچ تک‌راهه را بکار بردند. در این پیل کانال‌های جریان بر روی صفحات پلکسی ماشین‌کاری شده بود و صفحات مشبک مسی نقش جمع‌کننده‌های جریان را بر عهده داشتند. یانگ و همکارانش [۱۲] به مطالعه دوفازی پدیده طغیان در پیل سوختی غشای پلیمری با الگوی موازی تحت شرایط کاری مختلف پرداختند. آن‌ها صفحات انتهایی را از پلی کربنات و صفحات جمع‌کننده جریان را از فولاد ضدزنگ با روکشی از طلا ساختند. عرض و عمق کانال‌ها در این مطالعه ۱ میلی‌متر و طول آن‌ها ۱۰۰ میلی‌متر بود. به‌منظور مشاهده انباشت و پاک‌سازی قطرات در کانال‌های جریان سمت کاتد دوربین سونی با ۲۴ برابر بزرگ‌نمایی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش‌ها

- 1 Direct visualization of a transparent cell
- 2 Neutron radiography
- 3 X-ray radiography
- 4 Nuclear Magnetic Resonance
- 5 High Frequency Resistance

شبهه‌سازی پیل‌های سوختی غشای پلیمری به تفصیل بیان می‌گردد. شکل ۱- الف نشان‌دهنده نمای انفجاری اجزای پیل سوختی غشای پلیمری شفاف طراحی و ساخته شده در پژوهش حاضر به‌منظور شبهه‌سازی است. مطابق شکل ۱- ب، دامنه محاسباتی به‌منظور شبهه‌سازی شامل صفحات جمع‌کننده جریان، کانال‌های جریان عبور گاز، لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست برای دو سمت آند و کاتد و غشا در مرکز هندسه می‌باشد.

- فرضیات شبهه‌سازی بصورت زیر خلاصه می‌گردد:
- (الف) پیل در حالت پایا شبهه‌سازی می‌گردد.
- (ب) از اثر گرانش صرف‌نظر می‌شود.
- (ج) رژیم جریان گاز در کانال‌های جریان آرام می‌باشد.
- (د) مخلوط‌های گازی از قانون گازهای ایده‌آل پیروی می‌کنند.

- (ه) نواحی متخلخل بصورت ایزوتروپیک و همگن مدل‌سازی می‌گردند.
- (و) آب درون پیل در فاز مایع و بخار وجود دارد.
- (ز) اثرات مقاومت تماسی نادیده گرفته می‌شود.
- (ح) از افت اهمیک درون اجزای رسانا صرف‌نظر می‌شود.

۲-۱- معادلات انتقال

معادلات حاکم بر پیل‌های سوختی شامل بقای جرم، مومنتوم،

مشاهده و ثبت فرآیند پدیدارشدن قطرات آب را از منافذ لایه نفوذ گازی امکان‌پذیر کرد. در جدول ۱، جنس صفحات جمع‌کننده جریان و انتهای به‌کاررفته در پیل‌های سوختی شفاف خلاصه شده است.

در پژوهش حاضر هدف طراحی و ساخت یک پیل سوختی غشای پلیمری شفاف با الگوی جریان مارپیچ موازی چند راهه به‌منظور فراهم‌ساختن امکان مشاهده و مطالعه پدیده طغیان در کانال‌های جریان دو سمت آند و کاتد با استفاده از تکنیک عکس‌برداری مستقیم می‌باشد. بدین منظور ابتدا پیل مورد نظر با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت، طراحی و با استفاده از روش عددی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت مدل‌سازی می‌گردد. در مرحله ساخت ضمن بیان دقیق چالش‌های پیش رو، راه حل عملیاتی جهت غلبه بر آن‌ها ارائه می‌شود. پس از ساخت پیل، منحنی قطبیت حاصل از مدل عددی توسط نمونه آزمایشگاهی اعتبارسنجی خواهد شد و تاثیر استوکیومتری کاتد بر عملکرد پیل توسط کانتورهای مدل عددی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در انتها نیز از کانال‌های جریان سمت کاتد عکس‌برداری صورت پذیرفته و آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان با استفاده از تکنیک پردازش تصویر نمایان می‌گردد.

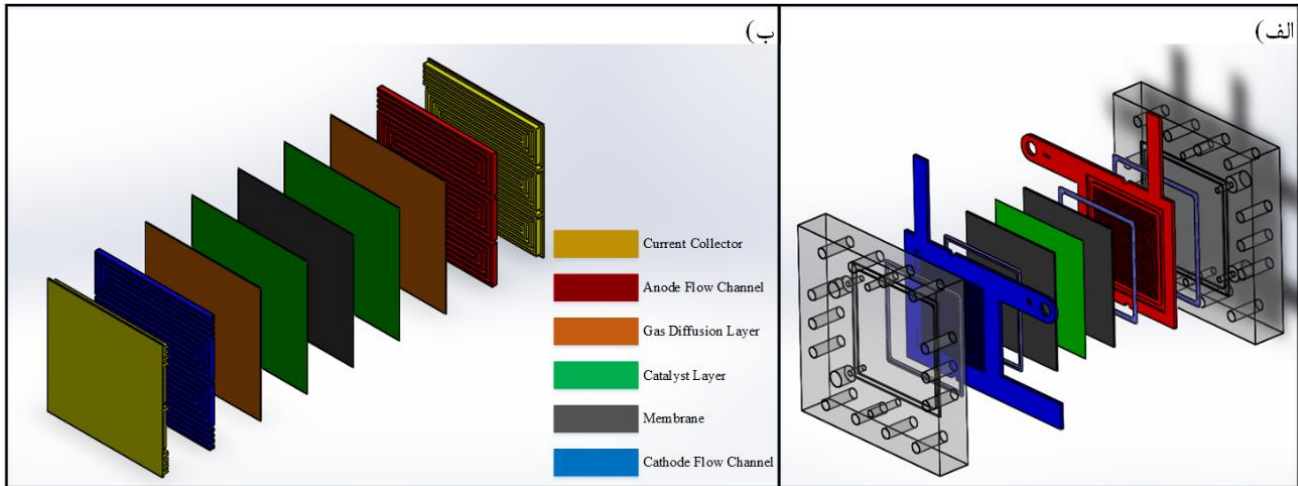
۲-۲ معادلات حاکم و روش عددی

در این بخش معادلات، فرضیات و روش عددی بکاررفته به‌منظور

جدول ۱: اجزای بکاررفته در طراحی پیل‌های سوختی شفاف در پژوهش‌های پیشین

Table 1. Materials used for transparent PEMFCs from different researchers

مرجع	صفحات جمع‌کننده جریان	صفحات انتهایی	توضیحات
توبر و همکاران [۱۳]	ورق مسی	پلکسی	
لیو و همکاران [۱۴]	فولاد ضدزنگ	پلکسی	
ژانگ و همکاران [۱۵]	استیل ضدزنگ طلاکاری شده	پلی کربنات	
ونگ و همکاران [۱۶]	ورق برنجی	اکرلیک	
لیو و همکاران [۱۷]	استیل ضدزنگ طلاکاری شده	پلکسی	
ونگ و همکاران [۱۸]	استیل ضدزنگ طلاکاری شده	پلی کربنات	
لیو و همکاران [۱۹]	استیل ضدزنگ طلاکاری شده	پلکسی	
پژوهش حاضر در تلاش اول (ناموفق)	استیل ضدزنگ ۳۱۶L	پلکسی	عدم موفقیت طرح به‌هنگام استفاده از روش لیزرکات بدلیل یکسان‌بودن مرتبه خطای این روش ماشین‌کاری و عرض کانال‌های جریان
✓ ضخامت صفحه ۱ mm			
✓ عرض کانال جریان ۰/۸ mm			
✓ عرض ریب ۰/۹ mm			
پژوهش حاضر در تلاش دوم (ناموفق)	فولاد فنی	پلکسی	عدم موفقیت طرح بدلیل مقاومت خوردگی کم فولاد فنی علی‌رغم سختی مناسب آن جهت وایرکات
✓ کلیه پارامترهای ابعادی مشابه تلاش اول			
پژوهش حاضر در تلاش سوم (طرح نهایی)	استیل ضدزنگ ۳۱۶L طلاکاری شده	پلکسی	سختی مناسب جهت وایرکات و مقاومت بالا در برابر خوردگی
✓ ضخامت صفحه ۲ mm			
✓ عرض کانال جریان ۱ mm			
✓ عرض ریب ۱/۱ mm			



شکل ۱. نمای انفجاری پیل سوختی غشای پلیمری الف: طرح ایجادشده در نرم‌افزار سالیدورکس جهت ساخت پیل شفاف ب: طرح نهایی ایجادشده جهت شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس

Fig. 1. Exploded View of transparent PEMFC (a) Designed model in SOLIDWORKS; (b) Final model for simulation in ANSYS software

جدول ۲: عبارات چشمه و چاه در معادلات انتقال

Table 2. Source and sink terms in transport equations

غشای پلیمری	لایه کاتالیست	لایه نفوذ گاز	کانال جریان	معادله بقا
$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	جرم
$S_\phi = -\frac{\mu}{K} \varepsilon \vec{V}$	$S_\phi = -\frac{\mu}{K} \varepsilon \vec{V}$	$S_\phi = -\frac{\mu}{K} \varepsilon \vec{V}$	$S_\phi = 0$	مومنوم
$S_\phi = \frac{I^2}{\sigma_{mem}}$	$S_\phi = h_{react} - R_{a,c} \eta_{a,c} + I^2 R_\Omega + h_L$	$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	انرژی
	$S_{H_2} = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right) - \frac{M_{W,H_2}}{2F} R_a$			
$S_\phi = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right)$	$S_{O_2} = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right) - \frac{M_{W,O_2}}{4F} R_c$	$S_\phi = 0$	$S_\phi = 0$	گونه‌ها
	$S_{H_2O} = -\nabla \cdot \left(\frac{n_d}{F} I \right) + \frac{M_{W,H_2O}}{2F} R_c$			

عبارت پخشی و عبارت چشمه می‌باشند. مقادیر کمیت انتقال و عبارت پخشی برای هر معادله انتقال به کمک روابط و تعیین می‌گردد.

انرژی و گونه است که به فرم کلی رابطه نوشته می‌شود.

$$\nabla \cdot (\rho \phi \vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi$$

(۱) پارامترهای ρ ، ϕ ، Γ و S_ϕ به ترتیب چگالی، کمیت انتقال،

می‌گردد [۲۰].

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (۴)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (۵)$$

در معادلات و σ ، هدایت الکتریکی، ϕ پتانسیل الکتریکی و R نشان‌دهنده عبارت چشمه جریان الکتریکی مبادله‌ای بر واحد حجم است.

هدایت الکتریکی اجزا بر اساس ماده انتخابی تعیین می‌گردد. برای غشا، هدایت یونی با استفاده از رابطه اشپینگر (رابطه) محاسبه می‌شود [۲۱]. همچنین باید توجه داشت که تنها در لایه کاتالیست و غشا مقادیر عبارات چشمه معادلات و تنها در لایه کاتالیست و غشا برابر صفر نمی‌باشد. مقادیر عبارات چشمه برای فاز جامد در سمت آند و کاتد از رابطه و برای غشا از رابطه بدست می‌آید.

$$R_{sol} = \begin{cases} -R_a \\ +R_c \end{cases} \quad (۶)$$

$$R_{mem} = \begin{cases} +R_a \\ -R_c \end{cases} \quad (۷)$$

در روابط و R_a و R_c با استفاده از روابط باتلر والمر (رابطه) در سمت آند و کاتد محاسبه می‌گردند.

۲-۳- معادله باتلر والمر

جریان الکتریکی تولیدی محلی در لایه کاتالیست با استفاده از رابطه باتلر والمر (رابطه) بدست می‌آید.

$$R_a = (1-s) \xi_a i_a^{ref} \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_a} \left(e^{\alpha_a F \eta_a / R_u T} - e^{-\alpha_c F \eta_a / R_u T} \right) \quad (۸)$$

$$R_c = (1-s) \xi_c i_c^{ref} \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_c} \left(-e^{\alpha_a F \eta_c / R_u T} + e^{-\alpha_c F \eta_c / R_u T} \right)$$

در رابطه، s کسر حجمی آب مایع^۱ (رابطه)، ξ سطح فعال مخصوص، i^{ref} چگالی جریان مرجع بر واحد سطح، $[]_{ref}$ غلظت هیدروژن و اکسیژن در لایه کاتالیست، $[]_{ref}$ غلظت مرجع هیدروژن

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{Continuity} \\ V & \text{Momentum} \\ T & \text{Energy} \\ X_k & \text{Species} \end{cases} \quad (۲)$$

$$\Gamma = \begin{cases} 0 & \text{Continuity} \\ \mu & \text{Momentum} \\ k_{eff} & \text{Energy} \\ D_{eff} & \text{Species} \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه پارامترهای k_{eff} و D_{eff} بیانگر ضریب هدایت گرمایی موثر و ضریب نفوذ موثر می‌باشند. ضریب پخش موثر به کمک رابطه محاسبه می‌گردد.

عبارات چشمه و چاه برای نواحی مختلف پیل مطابق جدول ۲ تعریف می‌گردد. در معادله بقای مومنتوم، عبارت چشمه در نواحی لایه نفوذ گاز، لایه کاتالیست و غشای پلیمری با استفاده از رابطه دارسی برای محیط‌های متخلخل تعریف می‌گردد. در معادله بقای انرژی، عبارت چشمه لایه کاتالیست در بردارنده تغییرات آنتالپی ناشی از انجام واکنش الکتروشیمیایی در لایه کاتالیست (h_{react})، تغییرات آنتالپی ناشی از افت فعالسازی در دو سمت آند و کاتد ($R_{a,c} \eta_{a,c}$)، اثر گرمایش ژول ($I^2 R_{\Omega}$) و تغییرات آنتالپی ناشی از چگالش و تبخیر (h_L) می‌باشد. در غشای پلیمری نیز عبارت چشمه بیانگر گرمایش حاصل از عبور پروتون‌ها در این ناحیه است. در معادله بقای گونه‌ها، عبارات چشمه و چاه تنها برای لایه کاتالیست و غشای پلیمری تعریف می‌گردند. در لایه کاتالیست این عبارات بیانگر پدیده الکتروسوموزیک، مصرف هیدروژن و اکسیژن و تولید آب است. از طرفی در غشای پلیمری عبارت چاه تنها نشان‌دهنده پدیده الکتروسوموزیک می‌باشد.

۲-۲- معادلات پتانسیل الکتریکی

در یک پیل سوختی غشای پلیمری واکنش اکسایش در سمت آند و کاهش در سمت کاتد بوقوع می‌پیوندد. نیروی محرک انجام این واکنش‌ها اختلاف پتانسیل ما بین فاز جامد و غشا می‌باشد. بنابراین دو معادله پتانسیل برای پیل در نظر گرفته می‌شود: نخست معادله به‌منظور شبیه‌سازی انتقال الکترون در قطعات جامد رسانا شامل جمع‌کننده‌های جریان و بخش جامد لایه نفوذ گازی و لایه کاتالیست و دیگری معادله که به کمک آن انتقال پروتون در غشا شبیه‌سازی

1 Water saturation

در رابطه ، C_r ثابت نرخ چگالش ($=S^{-1} 100$) می‌باشد. مقدار این ثابت با فرض یکسان بودن سرعت آب و گاز (قطرات بسیار ریز آب^۱) حاصل شده است. همچنین پارامترهای P_{sat} و P_{wv} بیانگر فشار بخار آب و فشار اشباع آب می‌باشند.

در محیط متخلخل، عبارت پخش موینگی جایگزین عبارت جابجایی در معادله می‌گردد. بنابراین پارامتر کسر حجمی آب مایع

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_l \frac{Ks^3}{\mu_l} \frac{dp_{cap}}{ds} \nabla s \right] = r_w \quad (14)$$

در رابطه ، K نشان‌دهنده نفوذپذیری و P_{cap} فشار موینگی می‌باشد. فشار موینگی بسته به آب‌دوست^۲ و یا آب‌گریز^۳ بودن سطوح متخلخل به کمک رابطه لورت (معادله) بدست می‌آید.

$$P_{cap} = \begin{cases} \frac{\chi \cos \theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} (1.417(1-s) - 2.12(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3) & \theta_c < 90^\circ \\ \frac{\chi \cos \theta_c}{(K/\varepsilon)^{0.5}} (1.417s - 2.12s^2 + 1.263s^3) & \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

در رابطه لورت χ کشش سطحی و θ_c زاویه تماس برای سطوح آب‌دوست ($\theta_c < 90^\circ$) و آب‌گریز ($\theta_c > 90^\circ$) است. پس از محاسبه کسر حجمی آب مایع، از این پارامتر به منظور اصلاح مقادیر ضریب نفوذ، باتلروالمر و ضریب تخلخل استفاده می‌شود. با فرض محیط رقیق، ضریب نفوذ گاز با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود.

$$D_{eff} = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{2.5} D_i^0 \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \quad (16)$$

در رابطه ، D_i^0 ضریب نفوذ جز i در دمای کاری 300 K و فشار مرجع 101325 Pa است [۲۴]. رسانایی یونی غشا با استفاده از رابطه اشپیرینگر [۲۱] محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{mem} = (0.00514\lambda - 0.00326)e^{1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})} \quad (17)$$

در رابطه ، λ محتوای آب است. اشپیرینگر و همکارانش به منظور

و اکسیژن، γ شاخص نمایی غلظت، α ضریب انتقال شارژ، η افت فعالسازی و F ثابت فارادی است. در واقع افت فعالسازی اختلاف پتانسیل الکتریکی فاز جامد و غشا می‌باشد و با استفاده از رابطه در سمت آند و رابطه در سمت کاتد محاسبه می‌گردد.

$$\eta_a = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$\eta_c = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{oc}$$

در رابطه ، V_{oc} بیانگر ولتاژ مدار باز است.

۲-۴- تشکیل آب مایع

همان‌گونه که ذکر شد در سمت کاتد پیل‌های سوختی غشای پلیمری آب در فاز مایع و یا بخار تولید می‌گردد. از آنجایی که عموماً دمای کارکردی پیل‌های سوختی غشای پلیمری کمتر از 100°C می‌باشد، چگالش ذرات بخار در اجزای پیل نیز منجر به تشکیل قطرات آب مایع می‌گردد. اگر چه وجود آب مایع سبب افزایش رسانایی یونی غشا می‌شود اما انباشت زیاد آب انسداد حفره‌های متخلخل لایه نفوذ گازی و کاتالیست را در پی دارد. در پژوهش حاضر از مدل اشباع به منظور شبیه‌سازی تشکیل و انتقال آب در پیل استفاده شده است [۲۲، ۲۳]. در این رویکرد تشکیل آب مایع در اجزای مختلف پیل به کمک پارامتر کسر حجمی آب مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پارامتر بصورت نسبت حجم آب مایع به حجم کل در هر یک از اجزای پیل تعریف (معادله) و با استفاده از معادله محاسبه می‌شود.

$$s = \frac{Vol_l}{Vol_{tot}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{V}_l s) = r_w \quad (12)$$

در رابطه ، ε ضریب تخلخل، زیروند l بیانگر آب مایع و r_w نرخ چگالش است که مطابق رابطه برای نواحی لایه نفوذ گازی و کاتالیست تعریف می‌شود.

$$r_w = \begin{cases} (1-s)c_r \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{H_2O} & P_{wv} > P_{sat} \\ sc_r \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{H_2O} & P_{wv} < P_{sat} \end{cases} \quad (13)$$

1 Fine mist
2 Hydrophile
3 Hydrophobe

محاسبه محتوای آب رابطه را ارائه دادند.

توسط پدیده نفوذ برگشتی با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{w,diff}(\lambda) = -\frac{\rho_{mem}}{M_{mem}} M_{H_2O} D_\lambda \nabla \lambda \quad (24)$$

در رابطه، ρ_{mem} و M_{mem} به ترتیب چگالی و وزن غشا در حالت خشک می‌باشند. در این معادله، ضریب نفوذ برگشتی با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود.

$$D_\lambda(\lambda) = 10^6 \times e^{2416\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)} \times (2.563 - 0.33\lambda + 0.0264\lambda^2 - 0.000671\lambda^3) \quad (25)$$

۲-۶- بقای جریان الکتریکی

از آنجایی که جریان الکتریکی تولیدی در مرزهای سه فازی لایه کاتالیست برای دو سمت آند و کاتد برابر است می‌توان معادله بقای جریان الکتریکی را به فرم رابطه نوشت.

$$\int_{anode} R_a dV = \int_{cathode} R_c dV \quad (26)$$

۲-۷- شرایط مرزی

شرایط مرزی بکاررفته در شبیه‌سازی حاضر به شرح زیر است:
 \ddot{u} در ورودی کانال‌های جریان سمت آند و کاتد دبی جرمی سیال ثابت می‌باشد و به کمک رابطه محاسبه می‌گردد.

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\zeta_a i A_{MEA} M_{H_2}}{2X_{H_2} F} \quad (27)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{\zeta_c i A_{MEA} M_{O_2}}{4X_{O_2} F}$$

در رابطه، ζ بیانگر ضریب استوکیومتری، A_{MEA} سطح فعال و X کسر جرمی می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که کسر جرمی اجزا با استفاده از رطوبت نسبی محاسبه می‌شود. در پژوهش حاضر از گازهای کاملاً مرطوب در دو سمت آند و کاتد استفاده شده است.
 - در خروجی کانال‌ها فشار برابر با فشار محیط در نظر گرفته شده است.

- در تمامی دیواره‌ها شرط عدم لغزش لحاظ شده است.

- از آنجایی که هیچ جریان یونی از مرزهای پیل خارج نمی‌شود

شار این عبارت در کلیه مرزهای خارجی برابر صفر می‌باشد (

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 & a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & a > 1 \end{cases} \quad (18)$$

در رابطه، a فعالیت آب است که به کمک رابطه محاسبه می‌گردد.

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (19)$$

مقادیر P_{wv} و P_{sat} با استفاده از روابط و بدست می‌آید. از آنجایی که شبیه‌سازی انجام‌شده به صورت دوفازی می‌باشد، عبارت ۵۲ به معادله اضافه شده است [۲۵].

$$P_{wv} = Y_{H_2O} P \quad (20)$$

$$\log_{10} P_{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.15) - 0.000091873(T - 273.15)^2 + 0.0000014454(T - 273.15)^3 \quad (21)$$

۲-۵- شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال آب

در پژوهش حاضر دو پدیده عمده انتقال آب در پیل سوختی غشای پلیمری شامل درگ الکتروسموزیک و نفوذ برگشتی شبیه‌سازی می‌گردند. شار مولی آب انتقال‌یافته توسط پدیده الکتروسموزیک از سمت آند به کاتد را می‌توان به کمک رابطه محاسبه کرد.

$$\dot{q}_{w,drag} = n_d(\lambda) \frac{iA}{F}$$

در رابطه، n_d ضریب درگ الکتروسموزیک نامیده می‌شود و بیانگر میانگین تعداد مولکول‌های آبی است که در هنگام انتقال هر پروتون به آن چسبیده‌اند. مقادیر این ضریب وابسته به محتوای آب غشا می‌باشد. در شبیه‌سازی حاضر به منظور محاسبه ضریب الکتروسموزیک در ناحیه غشای پلیمری از رابطه اشپیرینگر [۲۱] استفاده می‌شود (رابطه).

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

شار مولی آب نفوذکرده از سمت کاتد به آند در غشای پلیمری

$$\left(\frac{\partial \phi_{mem}}{\partial n} = 0\right)$$

- در ترمینال جمع کننده جریان سمت آند پتانسیل الکتریکی برابر صفر است ($\phi_{sol} = 0$).

- در ترمینال جمع کننده جریان سمت کاتد پتانسیل الکتریکی برابر با ولتاژ کاری پیل است ($\phi_{sol} = V_{cell}$).

- در سایر مرزهای خارجی شار پتانسیل الکتریکی برابر صفر است ($\frac{\partial \phi_{sol}}{\partial n} = 0$).

مشخصات فیزیکی اجزا به همراه شرایط مرزی بکاررفته در شبیه سازی حاضر در جدول ۳ ذکر شده است.

۸-۲- روش عددی

در پژوهش حاضر معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته سازی و به کمک الگوریتم سیمپل پیاده سازی شده اند. به منظور پایدارسازی حل و تسریع همگرایی، روش گرادیان مزدوج تثبیت شده^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر ضریب تخفیف^۲ برای فشار، مومنتوم، انتقال پروتون، انتقال الکترون، محتوای آب و آب اشباع به ترتیب برابر با ۰/۷، ۰/۳، ۰/۹۵، ۰/۹۵، ۰/۹۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در نهایت شروط همگرایی به شرح زیر می باشد:

- مانده معادله پیوستگی کم تر از 1×10^{-4} باشد.

- مانده معادله انرژی کم تر از 1×10^{-6} باشد.

- مقدار مطلق اختلاف جریان الکتریکی در دو سمت آند و کاتد کم تر از 1×10^{-5} باشد ($|i_a - i_c| \leq 1.0 \times 10^{-5} \text{ (A cm}^{-2}\text{)}$).

۳- طراحی و ساخت صفحات دوقطبی

به منظور طراحی پیل های سوختی غشای پلیمری شفاف بایستی کانال های جریان، شیار واشر آب بند، ترمینال جریان الکتریکی، محل عبور میله قید^۳، محل اتصال گرمکن ها و ورودی و خروجی کانال ها بر روی صفحات دوقطبی طراحی و ماشین کاری گردد. کانال های جریان مسیری تعریف شده از منی فولد ورودی به خروجی می باشند که وظیفه آن ها توزیع واکنش دهنده ها بر روی لایه نفوذ گاز و جمع آوری و تخلیه آب انباشته شده می باشد. واشرهای آب بند بایستی درون شیارهای ماشین کاری شده بر روی این صفحات قرار گیرند. از آنجایی که در

1 Bi-Conjugate Gradient stabilized method (BCGSTAB)

2 Under relaxation factor

3 Guide

پیل های سوختی شفاف صفحات دوقطبی نقش جمع کننده جریان را نیز برعهده دارند، بایستی بر روی صفحات دوقطبی ترمینال تعبیه شود. وجود محل عبور قید نیز به هنگام اسمبل کردن پیل به منظور مقید ساختن قطعات و جلوگیری از حرکت آن ها نسبت به یکدیگر ضروری است. به هنگام راه اندازی و به منظور افزایش دمای کارکرد پیل بایستی از گرمکن استفاده کرد که در پیل های شفاف محل قرارگیری آن ها نیز بر روی صفحات دوقطبی طراحی می گردد. شکل ۳ نشان دهنده صفحات دوقطبی طراحی شده در این پژوهش است.

کانال های جریان در پیل های سوختی غشای پلیمری شفاف بصورت راه به در طراحی می شوند. با توجه به این موضوع و ابعاد کانال ها، دو روش ماشین کاری لیزرکات و وایرکات توصیه می گردد. در تلاش اول برای ساخت صفحات دوقطبی از لیزرکات استفاده شد. بر طبق مشاهدات در ماشین کاری با اشعه لیزر به هنگام پیشروی بر روی پروفیل کانال ها، اطراف شعاع حرکتی دچار خوردگی می شود. از آنجایی که در طرح حاضر عرض کانال های جریان و ریب ها ناچیز است محدوده دقت برش لیزر و ابعاد کانال به یکدیگر نزدیک می باشد. بنابراین به هنگام استفاده از این روش ابعاد کانال های جریان و ریب بسیار نامنظم و غیریکنواخت می گردد (شکل ۲ الف). راه دیگر استفاده از روش وایرکات است. در روش وایرکات از عمل تخلیه الکتریکی برای براده برداری و پیشروی روی قطعه استفاده می شود. مزیت این روش را می توان دقت بالا دانست اما بایستی به هنگام ماشین کاری از صفحات با سختی بالا استفاده نمود و یا تعداد زیادی صفحه را به صورت موازی از طریق جوش به یکدیگر متصل کرد. بنابراین در سعی دوم از روش وایرکات استفاده گردید. همچنین به منظور جلوگیری از اعوجاج نواحی ریب به هنگام ماشین کاری فولاد فنی به کار گرفته شد (شکل ۲ ب). ذکر این نکته ضروری است که صفحات دوقطبی در مجاورت هیدروژن مرطوب در سمت آند و اکسیژن مرطوب در سمت کاتد قرار می گیرند. بنابراین در انتخاب جنس صفحات باید توجه داشت که ماده انتخابی (الف) در برابر خوردگی مقاوم بوده، (ب) رسانایی الکتریکی بالایی داشته باشد و (ج) سختی آن جهت ماشین کاری به روش وایرکات مناسب باشد.

بر مبنای این سه معیار مس، فولاد فنی و استیل L316 را می توان پیشنهاد داد. مس علیرغم داشتن رسانایی الکتریکی بالا مقاومت خوردگی و سختی کمی دارد. هرچند که صفحات دوقطبی

جدول ۳: پارامترهای فیزیکی، عملکردی و الکتروشیمیایی پیل سوختی غشای پلیمری در پژوهش حاضر

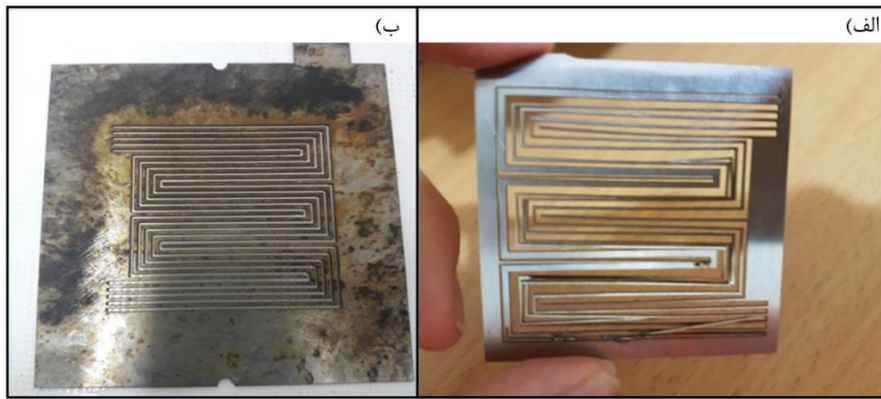
Table 3. Model parameters used in the simulations

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
شرایط مرزی					
دمای گازهای ورودی آند (T_a^{inlet})	۶۰	°C	دمای گازهای ورودی کاتد (T_c^{inlet})	۶۰	°C
رطوبت نسبی آند (RH_a)	۱۰۰	%	رطوبت نسبی کاتد (RH_c)	۱۰۰	%
استوکیومتری آند (ζ_a)	۲	-	استوکیومتری کاتد (ζ_c)	۲/۵	-
لایه نفوذ گاز					
تخلخل (ε)	۰/۷	-	نفوذپذیری (K)	1×10^{12}	m^{-2}
زاویه تماس سطح (θ_c)	۱۳۰	°			
کاتالیست					
تخلخل (ε)	۰/۴۷	-	نفوذپذیری (K)	1×10^{12}	m^{-2}
سطح فعال مخصوص (ξ)	2×10^5	m^{-1}	زاویه تماس سطح (θ_c)	۱۳۰	°
غشا					
هدایت حرارتی	۰/۱۶	$W m^{-1} K^{-1}$	وزن معادل در حالت خشک (M_m)	۱۱۰۰	$kg kmol^{-1}$
الکتروشیمی					
شاخص نمایی غلظت آند (γ_a)	۰/۵	-	شاخص نمایی غلظت کاتد (γ_c)	۱	-
ولتاژ مدار باز (V_{oc})	۰/۹	V	غلظت مرجع هیدروژن ($[H_2]_{ref}$)	۱	$kmol m^{-3}$
غلظت مرجع اکسیژن ($[O_2]_{ref}$)	۱	$kmol m^{-3}$	ضریب انتقال شارژ آند (α_a)	۱/۷	-
ضریب انتقال شارژ کاتد (α_c)	۱/۷	-	چگالی جریان مرجع آند (i_a^{ref})	۱۰۰۰۰	$A m^{-2}$

جدول ۴: پارامترهای ابعادی کانال‌های جریان و شیار آب‌بند

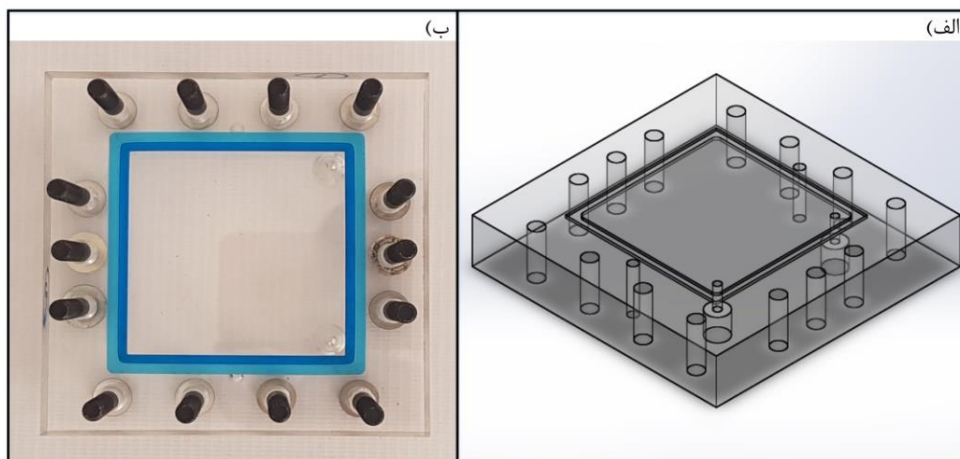
Table 4. Dimensional parameters of flow channels and seal grooves

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
سطح فعال (cm^2)	۲۵	عرض ریب (mm)	۱/۱	عرض کانال (mm)	۱
طول کانال (mm)	۵۰	عرض شیار آب‌بند (mm)	۳	عمق کانال (mm)	۲
عرض کانال (mm)	۱	عمق شیار آب‌بند (mm)	۱		



شکل ۲: ماشین کاری صفحه دو قطبی به روش الف: لیزرکات در تلاش اول (عدم موفقیت طرح بدلیل یکسان بودن مرتبه خطای این روش ماشین کاری و عرض کانال های جریان. کیفیت پایین ماشین کاری در این طرح مشهود است.) ب: وایرکات بر روی فولاد فنی در تلاش دوم (علی رغم موفقیت آمیز بودن ماشین کاری کانال های جریان بر روی صفحه، خوردگی شدید مشاهده می شود).

Fig. 2. Bipolar plate machining (a) Laser-cut on the first try (unsuccessful try due to the same order of accuracy of this machining method and the flow channels width. The low quality of machining is evident in this design); (b) Wire-cut on steel CK67 on the second try (in spite of the successful machining of the plate, severe corrosion is observed).



شکل ۳: نمای روبروی صفحات دو قطبی الف: طرح نهایی حاصل در تلاش سوم بر روی استیل L316 بعد از وایرکات (هیچ گونه خوردگی در صفحات مشاهده نمی شود.) ب: نمونه نهایی ساخته شده در تلاش سوم پس از طلاکاری با هدف افزایش رسانایی الکتریکی و جلوگیری از خوردگی احتمالی به هنگام عملکرد

Fig. 3. Front View of bipolar plates (a) Final design on steel 316L after wire-cut (no corrosion is observed on the plates.); (b) Gold-coated bipolar plates with the aim of increasing electrical conductivity and preventing possible corrosion.

مناسب نیست. بنابراین، در تلاش سوم از صفحات استیل L316 با ضخامت بیش تر استفاده شد و همچنین در طراحی جدید صفحات دو قطبی نسبت ضخامت ریب به کانال بالاتر در نظر گرفته شد. پارامترهای ابعادی کانال های جریان و شیار واشر آب بند در جدول ۴ ذکر شده است.

در ماشین کاری به روش وایرکات بدلیل افزایش شدید دما در سطح براده برداری، ترکیب شیمیایی سطح تغییر می کند. این امر

طلاکاری می شوند اما در دراز مدت بدلیل مقاومت خوردگی کم استفاده از مس گزینه مناسبی نمی باشد. فولاد فنی سختی بسیار بالا و رسانایی الکتریکی مناسبی دارد اما مقاومت خوردگی آن نیز کم است. خوردگی صفحه دو قطبی با جنس فولاد فنی پس از فرآیند ماشین کاری به خوبی در شکل ۲ ب مشاهده می شود. در این میان استیل L316 مقاومت خوردگی بالا و هدایت الکتریکی مناسبی دارد از طرفی سختی آن جهت ماشین کاری به روش وایرکات چندان

سطح فوقانی در تماس با آن برقرار نمی‌شود. این امر سبب نشت گاز به خارج پیل می‌گردد.

از طرفی انتخاب جنس نامناسب برای واشر نیز سبب خوردگی آن و یا آسیب دیدگی به‌هنگام عملکرد پیل می‌شود. در پژوهش حاضر از واشرهای آب‌بندی سیلیکونی به‌منظور جلوگیری از نشت گاز و آب تولیدی به خارج از پیل در صفحات دوقطبی و انتهایی استفاده شده است. علت انتخاب سیلیکون قابلیت عملکرد در محدوده وسیع دما (70°C - الی 200°C)، استحکام کششی (1100 PSI) و محدوده درجه سختی مناسب ($30-80$) این ماده می‌باشد. شکل ۵ نشان‌دهنده مقطع عرضی واشر درون شیار طراحی شده بر روی صفحات دوقطبی/پلکسی است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود سطح مقطع واشرها بصورت نیم‌بیضی طراحی و ساخته شده است. این امر سبب جمع‌شدگی مناسب واشر تحت فشار درون شیارهای آب‌بند می‌شود. از طرفی وجود سطح تماس گسترده مابین واشر و سطح فوقانی اطمینان از عدم نشتی را به دنبال خواهد داشت.

۳-۴- مونتاز قطعات و تست نشتی

پس از ساخت قطعات، مونتاز پیل انجام می‌گیرد. شکل ۶ نشان‌دهنده نمونه طراحی و ساخته‌شده پیل سوختی شفاف در پژوهش حاضر است. در هنگام مونتاز باید توجه داشت که گشتاور پیچشی کم پیچ‌ها سبب عدم فشردگی کافی اجزای پیل و در نتیجه آن افزایش مقاومت تماسی و وقوع نشتی می‌گردد. از طرفی اعمال گشتاور زیاد آسیب دیدگی اجزای پیل، نفوذ لایه نفوذگازی و مجموعه غشا الکتروکود به درون کانال‌ها و بسته‌شدن آن‌ها را در پی دارد. بنابراین بایستی گشتاور پیچشی پیچ‌ها در مقادیر بهینه تنظیم گردد. بدین منظور در تحقیق حاضر ابتدا گشتاور پیچشی کلیه پیچ‌ها در مقدار $0/6$ نیوتن‌متر تنظیم می‌شود. در ادامه گشتاور پیچشی بصورت پلکانی توسط ترک‌متر افزایش می‌یابد و در هر مرحله بر روی پیل تست انجام شده و منحنی عملکرد پیل ثبت می‌گردد. مطابق شکل ۷ بیش‌ترین توان تولیدی به ازای گشتاور پیچشی ۱ نیوتن‌متر حاصل می‌شود.

حصول اطمینان از کارکرد ایمن پیل بایستی تست نشتی انجام گیرد. نشت گاز در پیل‌های سوختی غشای پلیمری می‌تواند از داخل پیل به محیط خارج و یا گاز به گاز باشد.

کاهش مقاومت خوردگی استیل علی‌الخصوص در جداره داخلی کانال‌های جریان را در پی دارد. در این شرایط راهکار طلاکاری صفحات دوقطبی می‌باشد. به طور کلی طلاکاری صفحات دوقطبی با هدف افزایش رسانایی الکتریکی، جلوگیری از اکسیدشدن صفحات به‌هنگام عملکرد پیل و بهبود کیفیت عکس‌برداری جهت پردازش تصویر انجام می‌پذیرد. شکل ۳ ب نشان‌دهنده نمای روبروی صفحات دوقطبی پس از طلاکاری است.

۲-۳- طراحی و ساخت صفحات انتهایی شفاف

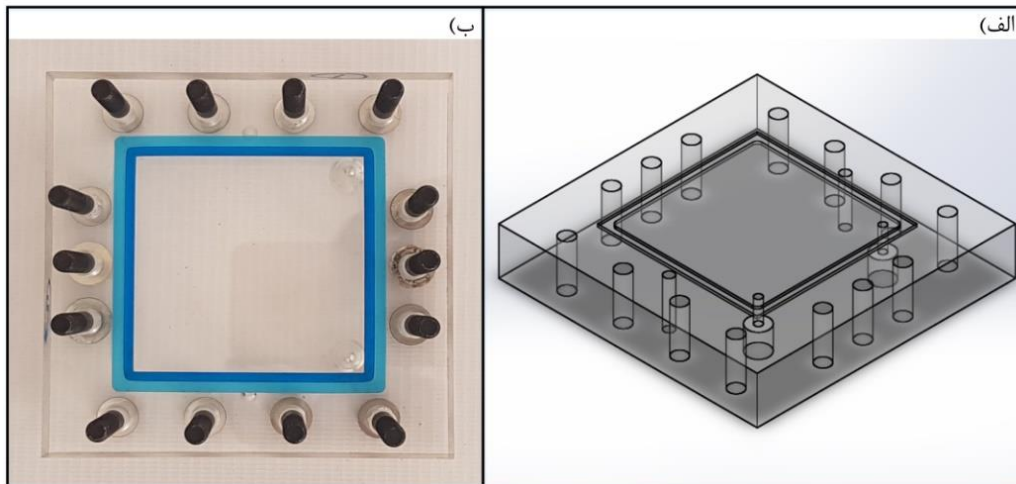
در پیل‌های سوختی غشای پلیمری نقش اصلی صفحات دوقطبی ایجاد توزیع یکنواخت فشار بر روی کلیه اجزای پیل است. همانگونه که گفته شد در پیل‌های سوختی شفاف بایستی صفحات انتهایی بگونه‌ای انتخاب گردند که امکان مشاهده کانال‌های جریان فراهم باشد. بدین منظور می‌توان از پلکسی‌گلس^۱ استفاده کرد. علت انتخاب پلکسی‌گلس بعنوان صفحات انتهایی، شفافیت، قابلیت ماشین‌کاری و توانایی عملکرد آن‌ها در دمای کم‌تر از 160°C است. مطابق شکل ۴ الف بر روی این صفحات بایستی منیفولدهای ورودی و خروجی جریان سیال، محل عبور میله قید، شیار واشر آب‌بند و محل عبور پیچ‌های اتصال تعبیه گردد.

۳-۳- طراحی و ساخت واشرهای آب‌بند

طراحی واشرهای آب‌بند بدلیل نقش حیاتی آن‌ها در جلوگیری از نشت گاز به خارج از پیل، مقاومت تماسی مابین قطعات و انتقال جرم درون پیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هنگامی که طراحی واشر از منظر ابعادی و یا ماده انتخابی بخوبی انجام نپذیرد اعمال فشار مونتاز سبب می‌گردد که دو سناریوی متفاوت به‌هنگام عملکرد پیل به‌وقوع بپیوندد:

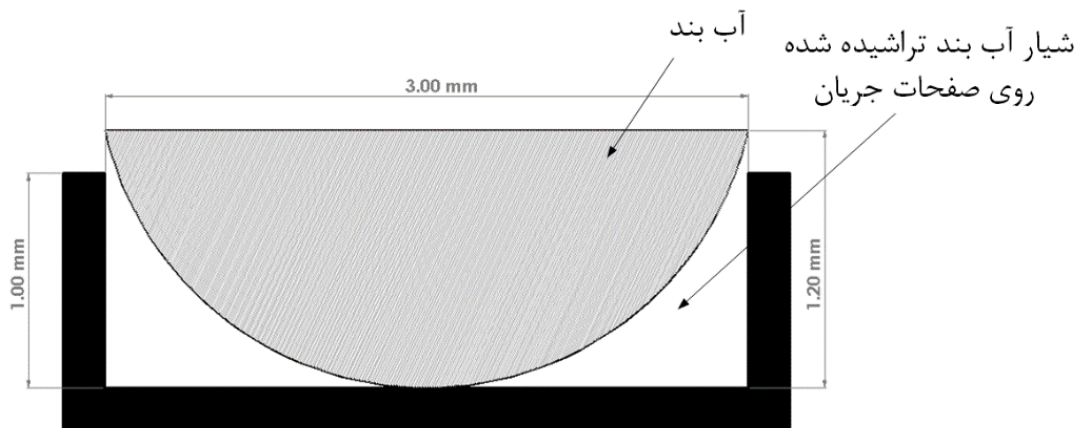
- تمامی واشر درون شیار قرار نگیرد. این امر سبب عدم اتصال مناسب مابین اجزای درون پیل و افزایش مقاومت تماسی می‌گردد. در این شرایط انتقال جرم نیز درون پیل با اختلال انجام می‌گیرد که افت عملکرد پیل را در پی دارد.
- اگر جنس انتخابی بسیار نرم باشد، هنگام اعمال فشار مونتاز واشر براحتی درون شیار قرار می‌گیرد و چسبندگی لازم بین واشر و

1 Plexiglass



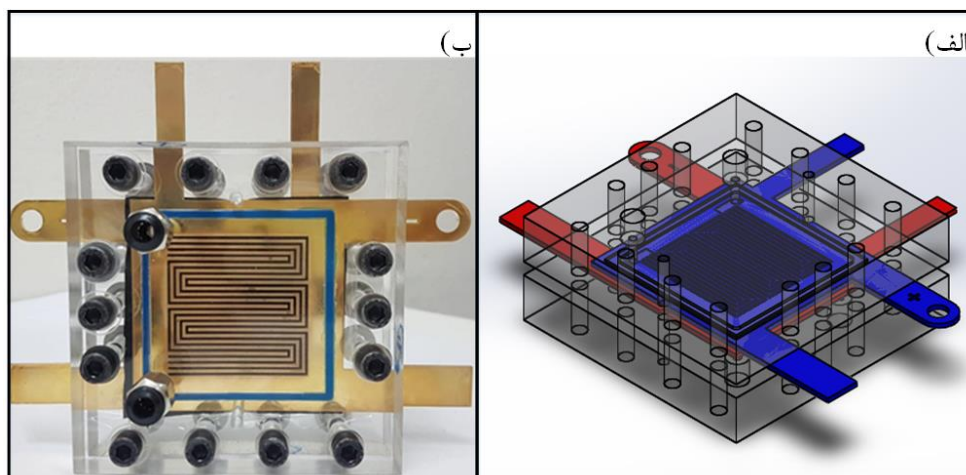
شکل ۴: طرح نهایی صفحه انتهایی شفاف الف: نمای ایزومتریک ب: نمای روبروی نمونه ساخته شده

Fig. 4. Transparent end plates (a) Isometric view of designed model in SOLIDWORKS; (b) Front view of manufactured plate.



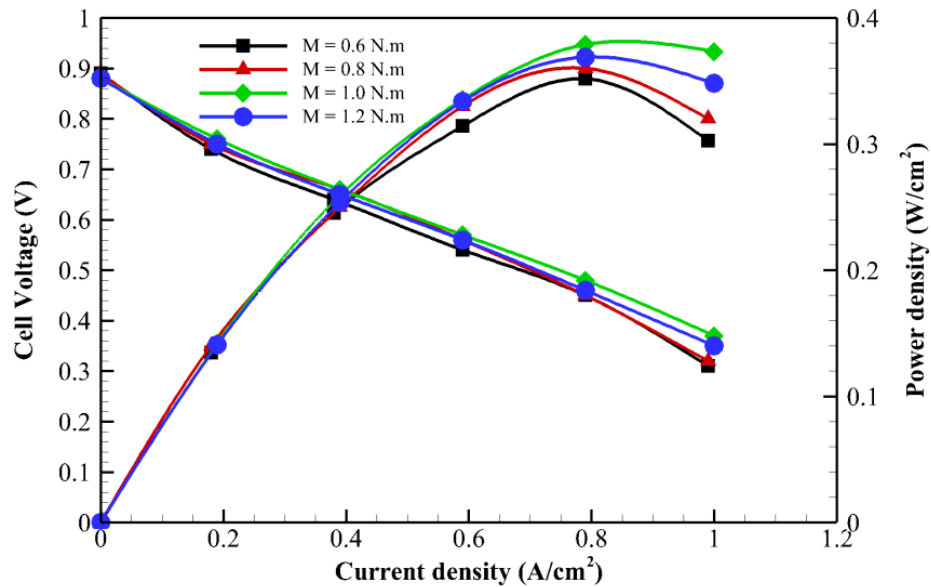
شکل ۵: نحوه قرارگیری واشر سیلیکونی درون شیارهای آب بند

Fig. 5. Insertion style of silicone gasket into seal grooves



شکل ۶: پیل سوختی شفاف ساخته شده در پژوهش حاضر الف: مدل مونتاژ شده در نرم افزار سالیدورکس ب: نمونه نهایی پس از مونتاژ

Fig. 6. Transparent PEMFC (a) Schematic in SOLIDWORKS; (b) Manufactured model.



شکل ۷: ثبت منحنی قطبیت پیل به ازای گشتاور پیچشی‌های مختلف در آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر
Fig. 7. Polarization curves of manufactured transparent PEMFC in fuel cell laboratory of Amirkabir University of Technology for different clamping pressures

گاز به گاز ابتدا کلیه خروجی‌ها بسته می‌شود سپس در یک سمت گاز نیتروژن وارد می‌شود و در سمت دیگر وجود گاز نیتروژن بررسی می‌گردد.

پس از ساخت و حصول اطمینان از عدم نشتی پیل، منحنی عملکرد آن ثبت می‌گردد. از آنجایی که مجموعه غشا الکتروود بکاررفته فعال می‌باشد تست‌های فعالسازی بر روی پیل انجام نمی‌پذیرد.

۴- نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی عددی

در این بخش از نتایج ابتدا به کمک منحنی عملکردی پیل، صحت مدل عددی ارائه‌شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی تاثیر استوکیومتری کاتد بر عملکرد پیل پرداخته می‌شود. بدین منظور از کانتورهای کسر مولی اکسیژن، کسر مولی آب و چگالی جریان تولیدی در سطح مشترک لایه نفوذگازی و لایه کاتالیست استفاده می‌شود. مطابق شکل ۱، مدل به کاررفته شامل صفحات جمع‌کننده جریان، کانال‌های جریان عبور گاز، لایه نفوذ گاز و لایه کاتالیست در دو سمت آند و کاتد و غشا در مرکز هندسه می‌باشد. باید

- نشت گاز از داخل پیل به محیط خارج: وجود این نشتی می‌تواند ناشی از طراحی ابعادی نامناسب واشرها و یا شیار واشرها، انتخاب جنس نامناسب برای واشرها، آسیب دیدگی واشرها و یا گشتاور پیچشی کم پیچ‌ها دانست.

- نشت گاز به گاز: عمدتاً علت وقوع این نوع نشتی آسیب دیدگی مجموعه غشا الکتروود (پارگی و یا ایجاد نقطه داغ^۱) است. گاهی اوقات حاشیه نفیون مجموعه غشا الکتروود به قدری کوچک است که لبه‌های آن در میانه واشر قرار می‌گیرد. این پدیده نیز می‌تواند منجر به نشت گاز به گاز درون پیل گردد.

به منظور بررسی نشت گاز از پیل به محیط خارج، در ورودی دو سمت آند و کاتد نیتروژن وارد شده و منیفولدهای خروجی بسته می‌شوند. مقدار دبی نیتروژن ورودی باید به قدری باشد که فشار در دو سمت پیل ۱/۵ برابر فشار کاری نرمال گردد. در ادامه ورودی‌های پیل نیز قطع شده و پیل به مدت ۱۰ دقیقه درون حوضچه آب قرار می‌گیرد. در صورت وقوع نشتی در اطراف پیل حباب تشکیل خواهد شد و یا فشار کاهش می‌یابد. در مرحله بعد به منظور بررسی نشتی

1 Hotspot

مقادیر سایر پارامترها در فرآیند شبیه‌سازی مطابق جدول ۳ تنظیم می‌گردد. همچنین جهت ورودی و خروجی اکسیژن و هیدروژن در دو سمت آند و کاتد ناهمسو در نظر گرفته می‌شود. در کلیه شکل‌های شبیه‌سازی این امر نشان داده شده‌است.

شکل ۹ نشان‌دهنده توزیع کسر مولی اکسیژن در سطح مشترک لایه نفوذ گاز و کاتالیست سمت کاتد است. مطابق شکل ۹-الف به ازای استوکیومتری پایین کاتد (=۱) کسر مولی اکسیژن در ابتدای ناحیه ورودی زیاد است و با نزدیک شدن به نواحی انتهایی بدلیل مصرف آن در طول مسیر شدیداً کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به وقوع پدیده گرسنگی در نواحی نزدیک به خروجی شود. از سوی دیگر، همان‌گونه که در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود در استوکیومتری بالای کاتد (=۴) نیز کسر مولی اکسیژن در امتداد کانال‌های جریان کاهش می‌یابد، اما در این شرایط بدلیل دبی بالای اکسیژن ورودی، اکسیژن بیش‌تری به لایه نفوذ گازی و کاتالیست نفوذ می‌کند. بنابراین احتمال وقوع پدیده گرسنگی در نواحی نزدیک به خروجی کم‌تر است.

مقایسه شکل ۹-الف و شکل ۹-ب نشان می‌دهد که علاوه بر نواحی نزدیک خروجی، در امتداد کانال‌های جریان، نواحی زیر ریب و همچنین زانویی‌ها نیز کسر مولی اکسیژن در استوکیومتری بالای کاتد بیش‌تر از استوکیومتری پایین آن می‌باشد.

شکل ۱۰ نشان‌دهنده کانتورهای کسر مولی آب در سطح مشترک لایه نفوذ گاز و کاتالیست سمت کاتد است. مطابق شکل ۱۰-الف به ازای استوکیومتری پایین کاتد (=۱) همواره کسر مولی آب از ابتدای ناحیه ورودی تا نواحی مرکزی و انتهایی بدلیل مصرف اکسیژن و همچنین تولید آب افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به وقوع پدیده طغیان در نواحی مرکزی و انتهایی شود. همچنین مشاهده می‌شود که به غیر از نواحی نزدیک به ورودی، مقادیر کسر مولی آب در نواحی زیر کانال‌های جریان و ریب نزدیک به یکدیگر می‌باشد. علت این امر دبی پایین اکسیژن در ورودی است که سبب افت فشار ناچیز در طول کانال‌های جریان و عدم توانایی پیل در خارج سازی آب از طریق آن‌ها می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود در استوکیومتری بالای کاتد (=۴) نیز کسر مولی آب در سطح مشترک لایه نفوذ گاز و کاتالیست در امتداد کانال‌های جریان افزایش می‌یابد. در این شرایط بدلیل دبی بالای اکسیژن و در نتیجه آن افت

توجه داشت که در پیل شفاف ساخته‌شده ساختار کانال‌های جریان و جمع‌کننده جریان با پیل‌های تجاری رایج متفاوت است. بنابراین هنگام شبیه‌سازی، جمع‌کننده جریان بصورت صفحه‌ای نازک لحاظ می‌گردد.

۴-۱-۱- استقلال شبکه و صحت‌سنجی

در این پژوهش معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی و به کمک الگوریتم سیمپل پیاده‌سازی شده‌اند. برای شبکه‌بندی اجزا مختلف پیل از المان‌های ساختار یافته شش وجهی استفاده شده است. به‌منظور بررسی استقلال شبکه، در پتانسیل الکتریکی ثابت، شبکه‌ها ریزتر می‌گردند و در هر مرحله چگالی جریان حاصل محاسبه می‌شود. هنگامی که اختلاف مابین چگالی جریان بدست‌آمده در دو مقدار متوالی تعداد المان کم‌تر از ۰/۱٪ باشد شرط استقلال شبکه ارضا شده‌است. بر این اساس تعداد المان‌های بهینه که دو شرط اساسی استقلال شبکه و زمان محاسباتی کم را ارضا کند برابر با ۶۸۹۰۹۴۴ المان می‌باشد (شکل ۸ الف).

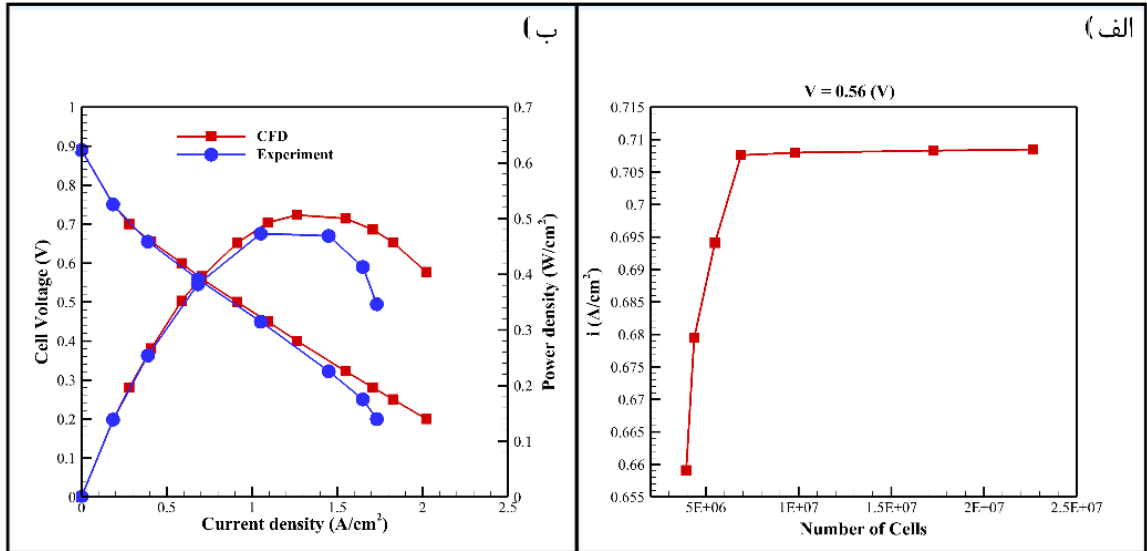
به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، در شرایط عملکردی تعریف‌شده مطابق جدول ۳، بر روی پیل آزمایش انجام می‌پذیرد و نمودار قطبیت آن ثبت می‌گردد. شکل ۸ ب نشان‌دهنده نمودارهای قطبیت مدل عددی و آزمایشگاهی است. بر مبنای رابطه ، خطای مدل عددی ۶/۸۷٪ است که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

$$Error = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|i_{exp_j} - i_{CFD_j}|}{i_{exp_j}}$$

در رابطه ، N تعداد نقاطی است که در آن‌ها منحنی قطبیت برای مدل عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه می‌شود، i_{exp} و i_{CFD} به ترتیب چگالی جریان به هنگام انجام آزمایش‌ها و چگالی جریان حاصل از شبیه‌سازی می‌باشند.

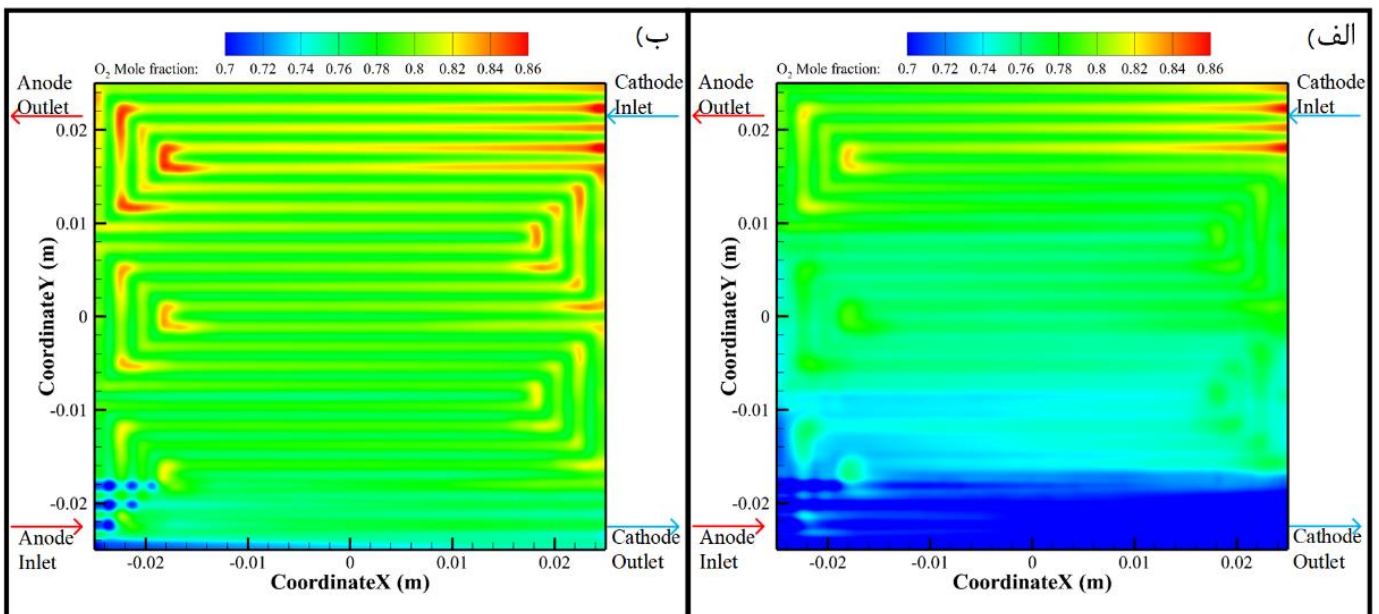
۴-۱-۲- تاثیر استوکیومتری کاتد بر عملکرد پیل

در این بخش به بررسی چگونگی تاثیرگذاری استوکیومتری کاتد بر پدیده‌های درون پیل پرداخته می‌شود. بدین منظور در مقادیر استوکیومتری ۱ و ۴ اکسیژن در سمت کاتد و ولتاژ کاری ۲۵/۰ ولت، شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد. ذکر این نکته ضروری است که



شکل ۸ الف: بررسی استقلال شبکه ب: صحت سنجی مدل عددی

Fig. 8. (a) Mesh independency investigation; (b) Validation of CFD model



شکل ۹: کسر مولی اکسیژن الف: استوکیومتری ۱ کاتد و ب: استوکیومتری ۴ کاتد

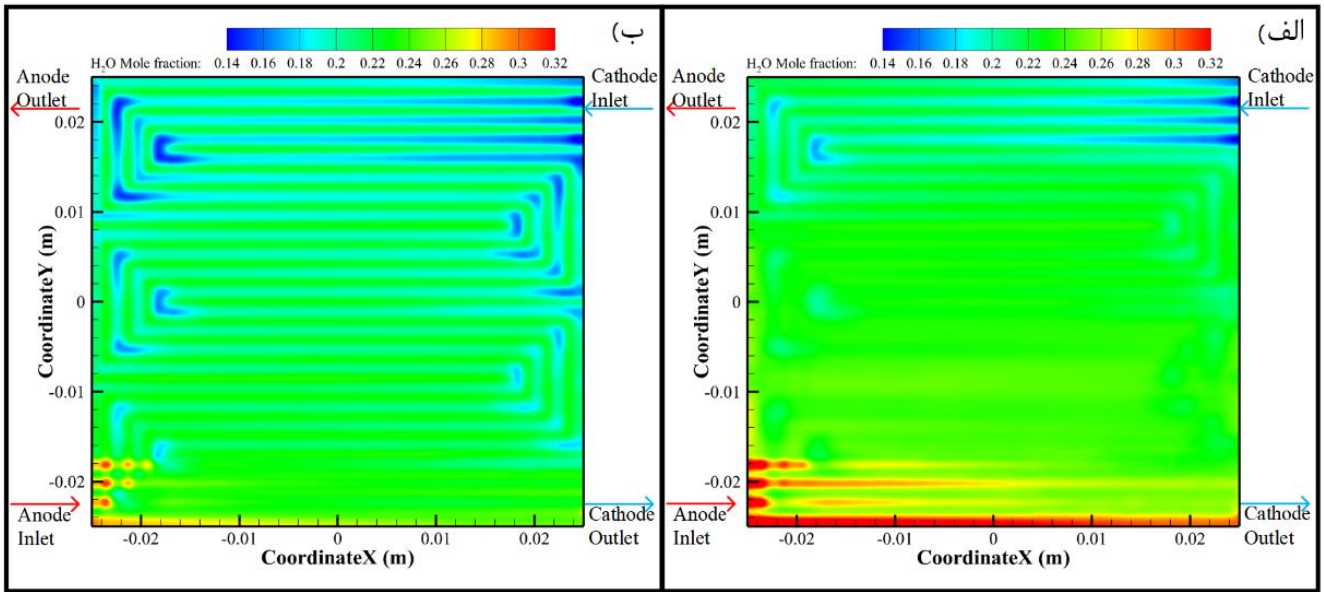
Fig. 9. Oxygen mole fraction (a) Cathode stoichiometry 1; (b) Cathode stoichiometry 4

استوکیومتری ۱ می‌باشد.

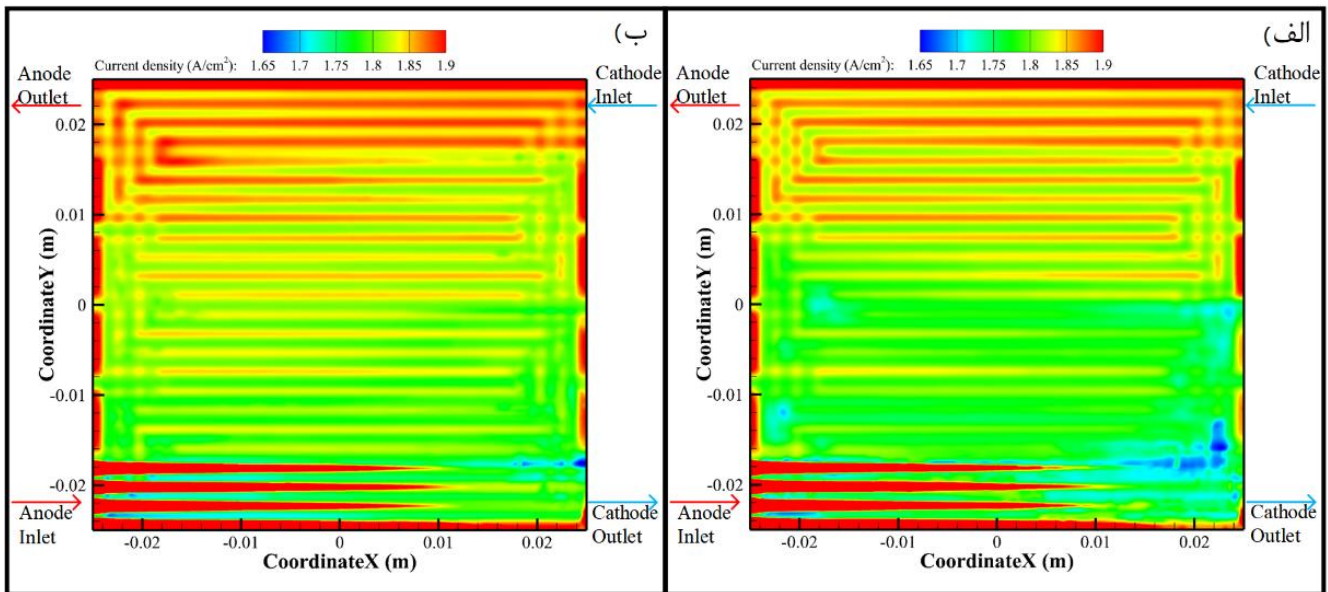
شکل ۱۱ نشان‌دهنده چگالی جریان تولیدی به ازای استوکیومتری‌های ۱ و ۴ کاتد می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود در استوکیومتری ثابت بیش‌ترین جریان تولیدی در نزدیکی ورودی سمت کاتد است و با حرکت در امتداد کانال‌های جریان و نزدیک‌شدن

فشار زیاد در طول کانال‌های جریان، کسر مولی آب در نواحی زیر کانال‌های جریان در مقایسه با ریب کم‌تر است.

مقایسه شکل ۱۰-الف و شکل ۱۰-ب نشان می‌دهد که علاوه بر نواحی نزدیک خروجی، در امتداد کانال‌های جریان و همچنین زانویی‌ها نیز کسر مولی آب به‌ازای استوکیومتری ۴ کم‌تر از



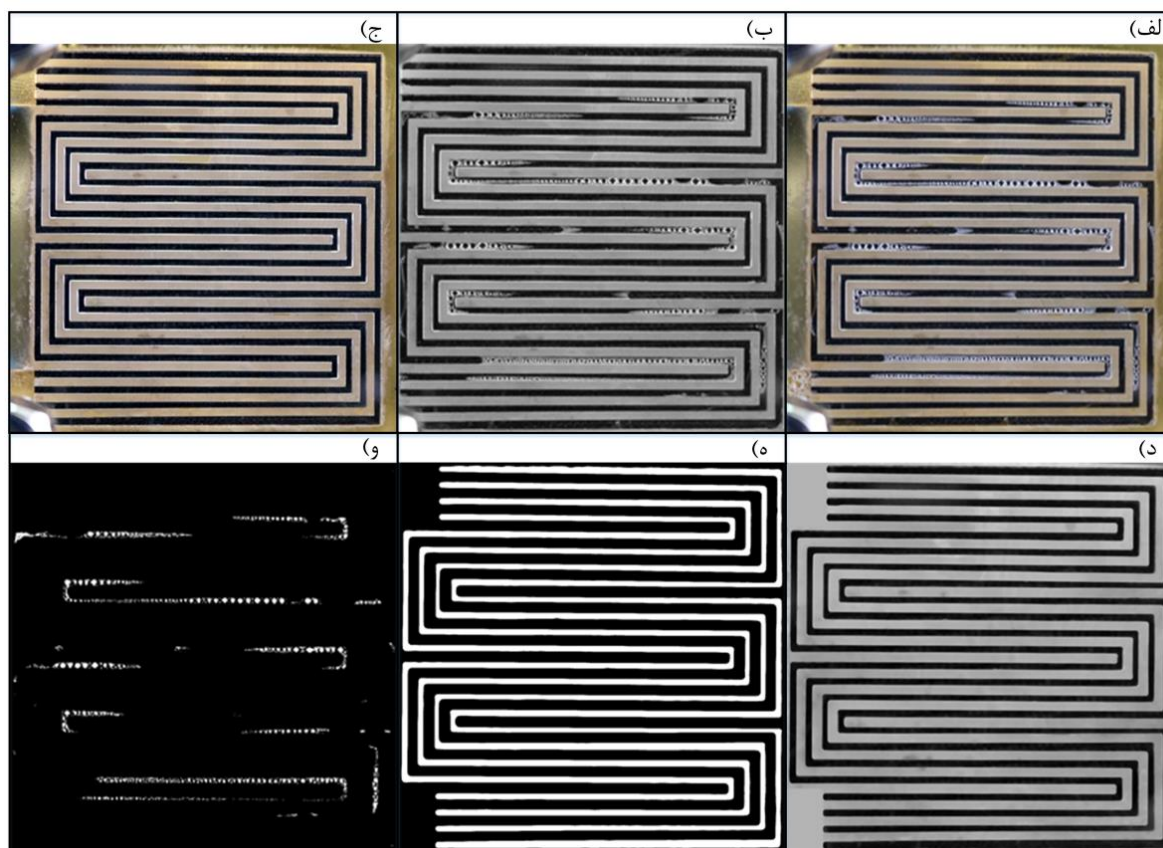
شکل ۱۰: کسر مولی آب الف: استوکیومتری ۱ کاتد و ب: استوکیومتری ۴ کاتد
Fig. 10. Water mole fraction (a) Cathode stoichiometry 1; (b) Cathode stoichiometry 4.



شکل ۱۱: چگالی جریان تولیدی الف: استوکیومتری ۱ کاتد و ب: استوکیومتری ۴ کاتد
Fig. 11. Current density (a) Cathode stoichiometry 1; (b) Cathode stoichiometry 4

قرار دارد. در این نواحی بدلیل غلظت بالای هیدروژن افزایش ناگهانی جریان تولیدی بوقوع می‌پیوندد.
 علاوه بر موارد فوق در الگوی جریان ناهمسو مدیریت آب در پیل

به خروجی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر در شبیه‌سازی حاضر جهت جریان اکسیژن و هیدروژن ناهمسو در نظر گرفته شده‌است. بنابراین در نواحی نزدیک به خروجی اکسیژن در سمت کاتد، ورودی هیدروژن



شکل ۱۲: کانال‌های جریان سمت کاتد الف: عکس رنگی از انباشت توده‌های آب به‌هنگام کارکرد پیل ب: عکس خاکستری پیل به‌هنگام کارکرد ج: عکس رنگی در حالت خشک د: عکس خاکستری در حالت خشک ه: ماسک و: توده‌های آب در عکس پس از پردازش عکس

Fig. 12. Sequences of image processing; (a) Captured operating image; (b) Gray scale of captured operating image; (c) Captured dry image; (d) Gray scale of captured dry image; (e) Produced mask; (f) Detection of accumulated water.

اکسیژن به مرزهای سه‌فازی کاتالیست در مقادیر استوکیومتری‌های بالا و همچنین غلظت بالای اکسیژن در تمامی طول مسیر (بدلیل دبی بالای آن) می‌باشد.

۲-۴- مشاهده جریان دوفازی درون کانال‌های جریان پیل سوختی شفاف

همانگونه که گفته شد هدف از طراحی پیل‌های سوختی غشای پلیمری شفاف مشاهده تشکیل و انباشت توده‌های آب در کانال‌های جریان در شرایط عملکردی است. به این منظور بایستی در هنگام عملکرد پیل از کانال‌های جریان (سمت آند و یا کاتد) فیلم‌برداری انجام پذیرد. در ادامه فیلم‌ها به عکس تبدیل شوند و توده‌های آب با استفاده از روش پردازش تصویر متمایز گردند. در پژوهش حاضر مراحل تشخیص قطرات آب در کانال‌های جریان به شرح زیر است:

نیز با کیفیت بهتری انجام می‌گیرد. بدین صورت که در ناحیه فوقانی پیل به دلیل ورود اکسیژن مرطوب و رطوبت ناچیز هیدروژن، پدیده غالب نفوذ برگشتی است. این امر سبب تامین رطوبت غشا در این نواحی می‌گردد. در نواحی نزدیک به خروجی پیل نیز علاوه بر وجود آب مایع در سمت کاتد، رطوبت نسبی هیدروژن ورودی نیز بالاست. بنابراین در این نواحی نیز پدیده‌های انتقال آب سبب تامین محتوای آب غشا و جلوگیری از خشکی آن می‌شود. بر مبنای آنچه که گفته شد انتظار می‌رود در الگوی جریان ناهمسو جریان الکتریکی تولیدی یکنواختی حاصل شود [۲۶-۲۸].

مقایسه جریان الکتریکی تولیدی به‌ازای استوکیومتری‌های مختلف کاتد نشان می‌دهد که با افزایش استوکیومتری کاتد علاوه بر این که جریان الکتریکی در ناحیه ورودی افزایش می‌یابد، توزیع یکنواخت‌تری از آن نیز حاصل می‌شود. علت این امر نفوذ بهتر

موقعیت دوربین دقیقا منطبق با موقعیت دوربین در ضبط تصاویر عملکردی باشد. هدف از این کار انطباق کامل ماسک و تصاویر عملکردی است.

اعمال ماسک به تصویر عملکردی به معنی ضرب درایه به درایه این دو ماتریس است. مطابق شکل ۱۲- و، در صورت اعمال ماسک، نواحی ریب حذف خواهند شد و تنها کانال‌های جریان باقی می‌ماند. در راستای تفکیک بیشتر نواحی شامل مه و آب از سایر نواحی کانال‌های جریان، می‌توان از تفاضل میان تصویر عملکردی و تصویر حالت خشک پیل استفاده کرد. گرچه محتوای آب کانال در شکل ۱۲- و نیز بخوبی مشخص است.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک پیل سوختی غشای پلیمری شفاف با هدف فراهم‌ساختن امکان مشاهده و مطالعه پدیده طغیان در کانال‌های جریان دو سمت آند و کاتد با استفاده از تکنیک عکس‌برداری مستقیم، طراحی و ساخته شد. بدین منظور ابتدا پیل مورد نظر طراحی و با استفاده از روش عددی مدلسازی گردید. در ادامه ضمن ساخت قطعات و مونتاژ پیل، از آن تست گرفته شد و منحنی قطبیت مدل عددی توسط مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها نیز از کانال‌های جریان سمت کاتد عکس‌برداری صورت پذیرفت و آب انباشته‌شده در کانال‌های جریان با استفاده از تکنیک پردازش تصویر نمایان گردید.

- بر مبنای این مطالعه نتایج حاصل بصورت زیر خلاصه می‌شود:
- مقایسه منحنی عملکرد مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی بیانگر خطای $6/87\%$ مدل عددی است که نشان از کفایت مدل عددی دارد.
- فرضیه در نظر گرفتن صفحات جمع‌کننده جریان و صفحات دوقطبی به صورت دو عضو مجزا به هنگام شبیه‌سازی پیل‌های سوختی غشای پلیمری شفاف، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد.
- افزایش استوکیومتری کاتد سبب افزایش غلظت اکسیژن در سطح لایه کاتالیست می‌شود. این امر توزیع یکنواخت جریان الکتریکی و بهبود عملکرد پیل را در پی دارد.
- با توجه به ابعاد کانال‌های جریان و صفحات دوقطبی پیل‌های سوختی غشای پلیمری شفاف، وایرکات مناسب‌ترین روش

شکل ۱۲- الف نشان‌دهنده تصویر رنگی بدست آمده از دوربین می‌باشد که از کانال‌های جریان سمت کاتد گرفته شده است. هر تصویر رنگی دربردارنده سه ماتریس است که در هر کدام شدت نور در طیف‌های رنگ قرمز، سبز و آبی ذخیره شده‌اند. به طور معمول در پردازش تصاویر دیجیتال، تصاویر رنگی به تصاویر خاکستری تبدیل می‌شوند. این امر سبب کاهش حجم تصاویر و افزایش سرعت اجرای الگوریتم می‌گردد. در طول این فرآیند تصویر رنگی که شامل سه ماتریس بوده است، به یک ماتریس تبدیل می‌شود. در ماتریس حاصل عدد ۲۵۵ نشان‌دهنده بیشترین شدت نور (رنگ سفید) و عدد صفر نشان‌دهنده کمترین شدت نور (رنگ سیاه) است. شکل ۱۲ ب از تبدیل تصویر رنگی شکل ۱۲- الف به یک تصویر خاکستری ۸ بیتی به دست آمده است.

از آنجایی که در پیل‌های سوختی غشای پلیمری شفاف هدف تشخیص توده‌های آب در کانال‌های جریان است، تنها کانال‌های جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرند و بایستی ناحیه میدان جریان از تصاویر استخراج و دیگر نواحی حذف گردد. بدین منظور ماسک ساخته می‌شود. ماسک ماتریسی با درایه‌های صفر یا یک می‌باشد. به هنگام ضرب درایه به درایه ماسک در یک تصویر، نقاط متناظر با یک‌های ماسک بدون تغییر باقی می‌مانند. از طرفی مقدار نقاط متناظر با صفرهای ماسک برابر صفر خواهد شد. بنابراین به منظور استخراج کانال‌های جریان از شکل ۱۲- ب، بایستی ماسک به گونه‌ای طراحی گردد که مقادیر درایه‌های متناظر با کانال‌ها در آن برابر یک و مقادیر درایه‌های متناظر با ریب‌ها برابر صفر باشد. از طرفی استفاده از شکل ۱۲- ب برای ساخت ماسک ممکن نیست زیرا آب موجود در کانال‌ها مانع دیده شدن کانال جریان می‌شود. به منظور گذر از این چالش تصاویر خشک پیل ثبت می‌گردد. مطابق شکل ۱۲- ج، تصاویر خشک تصاویری هستند که قبل از شروع به کار پیل و هنگامی که هیچ آبی در کانال‌های جریان وجود ندارد، ثبت می‌گردند.

در ادامه تصویر خشک رنگی (شکل ۱۲- ج) به تصویر خشک خاکستری (شکل ۱۲- د) تبدیل می‌شود. شکل ۱۲- ه، یک تصویر باینری ماسک می‌باشد. اعمال این ماسک به تصاویر عملکردی پیل سوختی سبب حذف نواحی سیاه رنگ (نواحی ریب) و باقی‌ماندن نواحی سفید رنگ (کانال‌های جریان) می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که به هنگام عکس‌برداری تصاویر خشک باید دقت داشت که

ماشین کاری می‌باشد.	R	جریان الکتریکی مبادله‌ای حجمی (Am^{-3})
- در انتخاب جنس صفحات دوقطبی بایستی مواردی چون مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی الکتریکی بالایی، سختی کافی جهت ماشین کاری به‌روش و ایرکات و قابلیت پوشش‌دهی توسط طلا را مدنظر داشت. با توجه به موارد مذکور، استیل ۳۱۶L مناسب‌ترین گزینه می‌باشد.	R_u	ثابت جهانی گازها ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- در طراحی واشره‌های آب‌بند استفاده از واشره‌های سیلیکونی با سطح مقطع نیم‌بیضی روشی مناسب جهت جلوگیری از نشتی و توزیع یکنواخت فشار می‌باشد.	R_{Ω}	مقاومت اهمی (Ω)
- بهینه‌سازی گشتاور پیچشی پیچ‌ها بدلیل نقش حیاتی آن‌ها در مقاومت تماسی و نشتی پیل پارامتر مهم دیگری است که بایستی پس از مونتاژ پیل انجام پذیرد. در پژوهش حاضر توان تولیدی حداکثر در مقدار گشتاور پیچشی بهینه ۱ نیوتن‌متر حاصل شد.	RH	رطوبت نسبی
- به‌کمک پیل‌های سوختی شفاف و روش پردازش تصویر، امکان مشاهده و ثبت توده‌های انباشته‌شده در کانال‌های جریان، رژیم جریان و سایر پدیده‌های دوفازی به‌هنگام کارکرد پیل به‌خوبی و با صرف هزینه کم میسر می‌شود.	S	کسر حجمی آب مایع
	S_{ϕ}	جملات چشمه معادله انتقال ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)
	T	دما (K)
	V	سرعت (ms^{-1})
	V_{oc}	ولتاژ مدار باز (V)
	Vol	حجم (m^3)
	X	کسر جرمی اجزا

علائم یونانی

α	ضریب انتقال شارژ
γ	شاخص نمایی غلظت
Γ	عبارت پخشی در معادله انتقال
ε	تخلخل
ξ	سطح فعال مخصوص (m^{-1})
η	پتانسیل فعالسازی (V)
θ_c	زاویه تماس
λ	محتوای آب
μ	ویسکوزیته (NSm^{-2})
ζ	ضریب استوکیومتری
ρ	چگالی (kg m^{-3})
σ	هدایت الکتریکی و یونی (Sm^{-1})
ϕ	پتانسیل الکتریکی (V)
φ	کمیت انتقال در معادله انتقال
χ	کشش سطحی (N.m^{-1})

زیرنویس‌ها

a	آند
c	کاتد
cap	موینگی
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی (عددی)
eff	موثر
exp	آزمایشگاهی
H_2	هیدروژن
H_2O	آب
l	مایع
mem	غشا
oc	مدار باز
O_2	اکسیژن
react	واکنش الکتروشیمیایی
ref	مرجع
sat	اشباع
sol	جامد
wv	بخار آب

فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	فعالیت آب
A	سطح فعال (m^2)
D	ضریب نفوذ اجزا ($\text{m}^2 \text{s}$)
F	ثابت فارادی (C mol^{-1})
h	آنتالپی (J)
i	چگالی جریان (Am^{-2})
I	جریان (A)
k	ضریب هدایت گرمایی موثر ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
K	قابلیت نفوذ خالص (m^{-1})
M	جرم مولکولی (kg kmol^{-1})
n_d	ضریب درگ الکتروسموزیک
P	فشار (Pa)
$q_{w,drag}$	شار مولی پدیده درگ الکتروسموزیک (mol)
$q_{w,diff}$	شار مولی پدیده نفوذ برگشتی (mol)
r_w	نرخ چگالش ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)

بالانویس‌ها

ورودی
مرجع inlet
ref

مراجع

- Hasheminasab, G. Ahmadi, The experimental study of water management in the cathode channel of single-serpentine transparent proton exchange membrane fuel cell by direct visualization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(6) (2015) 2808-2832.
- [10] D. Spornjak, A.K. Prasad, S.G. Advani, Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 170(2) (2007) 334-344.
- [11] Z. Zhan, C. Wang, W. Fu, M. Pan, Visualization of water transport in a transparent PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1) (2012) 1094-1105.
- [12] X.G. Yang, F.Y. Zhang, a.L. Lubawy, C.Y. Wang, Visualization of Liquid Water Transport in a PEFC, *Electrochemical and Solid-State Letters*, 7(11) (2004) A408-A408.
- [13] K. Tüber, D. Pócza, C. Hebling, Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 124(2) (2003) 403-414.
- [14] X. Liu, H. Guo, C. Ma, Water flooding and two-phase flow in cathode channels of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 156(2) (2006) 267-280.
- [15] F.Y. Zhang, X.G. Yang, C.Y. Wang, Liquid Water Removal from a Polymer Electrolyte Fuel Cell, *Journal of The Electrochemical Society*, 153(2) (2006) A225-A232.
- [16] F.-B. Weng, A. Su, C.-Y. Hsu, C.-Y. Lee, Study of water-flooding behaviour in cathode channel of a transparent proton-exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 157(2) (2006) 674-680.
- [17] 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*, 52(11) (2007) 3607-3614.
- [18] S. Ge, C.-Y. Wang, Liquid Water Formation and Transport in the PEFC Anode, *Journal of The Electrochemical Society*, 154(10) (2007) B998-B1005.
- [19] 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*, [1] 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, *Journal of Power Sources*, 195(15) (2010) 4531-4553.
- [2] W. Yuan, Y. Tang, M. Pan, Z. Li, B. Tang, Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance, *Renewable Energy*, 35(3) (2010) 656-666.
- [3] A.D. Le, B. Zhou, A generalized numerical model for liquid water in a proton exchange membrane fuel cell with interdigitated design, *Journal of Power Sources*, 193(2) (2009) 665-683.
- [4] P. Quan, M.-C. Lai, Numerical study of water management in the air flow channel of a PEM fuel cell cathode, *Journal of Power Sources*, 164 (2007) 222-237.
- [5] 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*, 36(19) (2011) 12381-12392.
- [6] J.P. Owejan, T.A. Trabold, D.L. Jacobson, M. Arif, S.G. Kandlikar, Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17) (2007) 4489-4502.
- [7] R. Banerjee, S.G. Kandlikar, Experimental investigation of two-phase flow pressure drop transients in polymer electrolyte membrane fuel cell reactant channels and their impact on the cell performance, *Journal of Power Sources*, 268 (2014) 194-203.
- [8] A. Bozorgnezhad, M. Shams, H. Kanani, M. Hasheminasab, G. Ahmadi, Two-phase flow and droplet behavior in microchannels of PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(42) (2016) 1-18.
- [9] A. Bozorgnezhad, M. Shams, H. Kanani, M.

- [25] B.M. Eaton, One Dimensional, Transient Model of Heat, Mass, and Charge Transfer in a Proton Exchange Membrane.(2001) ,
- [26] A. Iranzo, M. Muñoz, F. Rosa, J. Pino, Numerical model for the performance prediction of a PEM fuel cell. Model results and experimental validation, International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 11533-11550.
- [27] J. Wang, Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: A critical review, Applied Energy, 157 (2015) 640-663.
- [28] A.P. Manso, F.F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, M. Garmendia Mujika, Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review, International Journal of Hydrogen Energy, 37(20) (2012) 15256-15287.
- 33(3) (2008) 1040-1051.
- [20] H. Heidary, M.J. Kermani, B. Dabir, Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances, Energy Conversion and Management, 124 (2016) 51-60.
- [21] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, S. Gottesfeld, Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, 138(8) (1991) 2334-2342.
- [22] J.H. Nam, M. Kaviany, Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46(24) (2003) 4595-4611.
- [23] J.S. Yi, T. Van Nguyen, Multicomponent Transport in Porous Electrodes of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using the Interdigitated Gas Distributors, 146(1) (1999) 38-45.
- [24] S. Um, C.Y. Wang, K.S. Chen, Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, 147(12) (2000) 4485-4493.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Hasheminasab, M. J. Kermani , S. S. Nourazar, M. H. Khodsiani. Simulation, manufacturing and test of a transparent proton-exchange membrane fuel cell. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 2031-2052.

DOI: [10.22060/mej.2020.17282.6571](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17282.6571)



