ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):89-94.

Sealing Methods in Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells

ARTICLE INFO

Authors
Pashaie P.[1*],
Babaei R.[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

*** Correspondence**
Address: Tehran, Vanak Square, East Brazil Street, No. 4, National University of Skills Central Building; Postal Code: 1435763811
ppashaie@nus.ac.ir

How to cite this article
Pouya Pashaie, Ramzan Babaei. Sealing Methods in Low-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Proceedings of the 6th National Conference on Mechanical-Civil Engineering and Advanced Technologies. 2024; 24(11):89-94.*

ABSTRACT

Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) are recognized as one of the promising technologies for clean energy production due to their high efficiency, low operating temperature, and environmental compatibility. In these cells, the Membrane Electrode Assembly (MEA), as the core component, plays a crucial role in the system's performance. One of the main challenges in designing and operating this assembly is preventing the leakage of fuel and oxidant gases, which directly impacts the fuel cell's overall efficiency. This paper reviews various sealing methods for the MEA, categorizing them into four main types: direct membrane sealing (PEM), membrane sealing with a plastic frame, MEA sealing with a frame, and rigid protective frame sealing. Each method has its unique features and can effectively improve performance and extend the operational lifespan of fuel cells, depending on the design and operational requirements. The results indicate that integrated sealing structures produced through injection molding processes are suitable for mass production due to their cost-effectiveness and ease of assembly. Additionally, rigid protective frame structures, owing to their high resistance to pressure and ability to prevent membrane damage, are better suited for applications requiring higher stability. Finally, the paper provides recommendations to enhance sealing methods and improve the efficiency of membrane fuel cells.

Keywords Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Membrane Electrode Assembly, Sealing, Rigid Protective Frame, Injection Molding

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک، عمران و فناوری‌های پیشرفته

روش‌های نشت بندی در پیل‌های سوختی پلیمری دما پایین

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
پویا پاشایی[1*]
رمضان بابائی[1]

[1] گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

*** نویسنده مسئول**
آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ٤، ساختمان مرکزی دانشگاه ملی مهارت؛ کدپستی: ١٤٣٥٧٦٣٨١١
ppashaie@nus.ac.ir

چکیده

پیل‌های سوختی غشاء پلیمری (PEMFC) به دلیل بازدهی بالا، دمای عملیاتی پایین و سازگاری با محیط زیست به عنوان یکی از فناوری‌های نویدبخش برای تولید انرژی پاک شناخته می‌شوند. در این پیل‌ها، مجموعه الکترود غشایی (MEA) به‌عنوان قلب اصلی، نقشی کلیدی در عملکرد سیستم ایفا می‌کند. یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و عملکرد این مجموعه، جلوگیری از نشت گازهای سوخت و اکسیدکننده است که عملکرد نهایی پیل سوختی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مقاله، روش‌های مختلف نشت‌بندی در مجموعه الکترود غشایی بررسی و به چهار دسته اصلی شامل نشت‌بندی مستقیم غشاء (PEM)، نشت‌بندی غشاء با قاب پلاستیکی، نشت‌بندی MEA با قاب، و نشت‌بندی قاب محافظ صلب تقسیم می‌شوند. هر یک از این روش‌ها ویژگی‌های خاص خود را دارند و بسته به نیازهای عملیاتی و طراحی، می‌توانند در بهبود عملکرد و افزایش عمر مفید پیل‌های سوختی مؤثر باشند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که ساختارهای یکپارچه نشت‌بندی که از طریق فرآیند قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند، به دلیل کاهش هزینه‌ها و سهولت در مونتاژ، گزینه مناسبی برای تولید انبوه پیل‌های سوختی هستند. همچنین، ساختارهای قاب محافظ صلب به دلیل مقاومت بالا در برابر فشار و توانایی جلوگیری از تخریب غشا، برای کاربردهایی با نیاز به پایداری بیشتر مناسب هستند. در نهایت، این مقاله به ارائه پیشنهاداتی برای بهبود روش‌های نشت‌بندی و افزایش کارایی پیل‌های سوختی غشایی می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها پیل سوختی پلیمری، مجموعه الکترود غشایی، نشت‌بندی، قاب محافظ صلب، قالب‌گیری تزریقی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

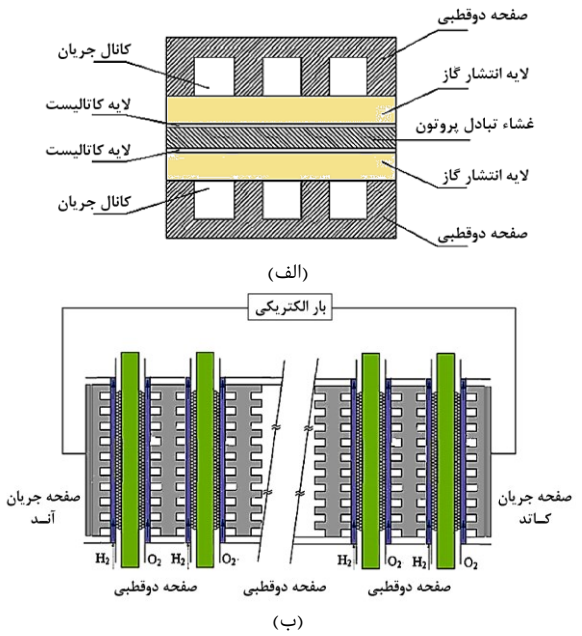
۱- مقدمه

پیل‌های سوختی پلیمری (PEMFC[1]) به دلیل مزایای متعدد خود از جمله بازدهی بالا، دمای عملیاتی پایین و سازگاری با محیط زیست، به یکی از محبوب‌ترین فناوری‌های تولید انرژی تبدیل شده‌اند. این نوع پیل‌های سوختی به دلیل نداشتن قطعات متحرک و عملکرد بی‌صدایشان، به عنوان یک گزینه مناسب برای تولید انرژی پاک در زمینه‌های مختلفی از جمله حمل‌ونقل، سیستم‌های تولید برق خانگی و برنامه‌های نظامی شناخته می‌شوند [۱]. با این حال، عملکرد نهایی این پیل‌ها به شدت به کیفیت و ساختار مجموعه الکترود غشایی (MEA[2]) وابسته است، که قلب اصلی پیل سوختی را تشکیل می‌دهد. در شکل ۱-الف، ساختار رایج تک سلول پیل سوختی پلیمری مشاهده می شود که اجزایی همچون صفحات جریان آند و کاتد، لایه‌های انتشار گاز، لایه‌های کاتالیست و غشای تبادل پروتون را در بر می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل ۱-ب نشان داده شده‌است، مجموعه پیل سوختی از تعدادی سلول مجزا تشکیل می‌گردد که بصورت یک پشته[3] پیل سوختی شناخته می‌شود.

مجموعه الکترود غشایی یکی از کلیدی‌ترین اجزای پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC[4]) است که ساختاری شبیه به ساندویچ دارد و شامل غشای تبادل پروتون (PEM)، لایه‌های الکتروکاتالیست و لایه‌های انتشار گاز (GDL[5]) می‌شود [۲]. یکی از چالش‌های اصلی در طراحی و عملکرد پیل‌های سوختی، جلوگیری از نشت گازهای سوخت و اکسیدکننده از طریق MEA است [۳-۸]. این امر مستلزم وجود ساختارهای آب‌بندی مؤثر و کارآمد است که بتواند از نشت گازها جلوگیری کند و به بهبود عملکرد پیل سوختی کمک کند.

آب‌بندی یکی از عوامل کلیدی در حفظ عملکرد بهینه و طول عمر پیل‌های سوختی است. ساختارهای آب‌بندی نقش مهمی در جلوگیری از مخلوط شدن گازهای سوخت و اکسیدکننده در داخل پیل و همچنین جلوگیری از نشت این گازها به خارج از پیل دارند [۹]. به علاوه، این ساختارها باید با سایر اجزای پیل سوختی هماهنگ باشند تا نیروی فشاری مناسب بین اجزا ایجاد شود و مقاومت الکتریکی بین اجزا به حداقل برسد. هرگونه نقص در ساختارهای آب‌بندی می‌تواند منجر به کاهش عملکرد پیل سوختی، افزایش نشت گازها و کاهش عمر مفید سیستم شود [۱۰].

تحقیقات متعددی در زمینه ساختارهای آب‌بندی انجام شده و این ساختارها به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: آب‌بندی مستقیم غشا(PEM) ، آب‌بندی غشا با قاب پلاستیکی، آب‌بندی MEA با قاب و آب‌بندی قاب محافظ صلب [۱۱]. هر یک از این ساختارها دارای ویژگی‌ها و مزایای خاصی هستند که به بهبود عملکرد و طول عمر پیل‌های سوختی کمک می‌کنند. برای مثال، ساختار آب‌بندی مستقیم غشا، به دلیل سادگی در طراحی و قابلیت استفاده مجدد، به عنوان یک گزینه مناسب برای بسیاری از کاربردهای پیل سوختی مطرح شده است. از سوی دیگر، ساختارهای آب‌بندی با قاب پلاستیکی، به دلیل قابلیت تزریق مواد آب‌بندی به قاب و ایجاد یکپارچگی بیشتر، به عنوان یک گزینه مناسب برای تولید انبوه شناخته شده‌اند [۱۲].



شکل ۱) شماتیک پیل سوختی پلیمری دما-پایین؛ (الف) ساختار تک سلول؛ (ب) ساختار پشته پیل سوختی.

در ساختارهای آب‌بندی قاب محافظ صلب، قاب‌های مقاومی از موادی نظیر تفلون و پلی‌اتیلن نافتالات ساخته می‌شوند که می‌توانند در برابر فشارهای بالا مقاومت کرده و از تخریب غشای فعال جلوگیری کنند [۱۳]. این نوع ساختارها اگرچه پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر هستند، اما به دلیل توانایی بالا در حفظ یکپارچگی و عملکرد مطلوب پیل سوختی، در برخی از کاربردهای حساس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تجاری‌سازی موفقیت‌آمیز پیل‌های سوختی به طراحی و توسعه ساختارهای آب‌بندی مناسب وابسته است. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود عملکرد است. ساختارهای آب‌بندی یکپارچه که از طریق قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند، به دلیل کاهش هزینه‌های تولید و سهولت در مونتاژ پیل‌های سوختی، به عنوان یک راهکار امیدوارکننده برای تجاری‌سازی مطرح شده‌اند [۱۴]. این ساختارها با ایجاد یکپارچگی بیشتر بین غشا و اجزای آب‌بندی، می‌توانند به کاهش نشت گازها و افزایش عمر مفید سیستم کمک کنند.

از سوی دیگر، ساختارهای آب‌بندی قاب محافظ صلب، به دلیل توانایی بالا در تحمل فشارهای فشاری و جلوگیری از تخریب غشا، می‌توانند در کاربردهایی که نیاز به پایداری بالاتری دارند، مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، هزینه بالای تولید و پیچیدگی مونتاژ این ساختارها، از جمله چالش‌هایی است که باید در طراحی و تولید آنها مدنظر قرار گیرد [۱۵].

[1] Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
[2] Membrane Electrode Assembly
[3] Stack
[4] Proton Exchange Membrane Fuel Cell
[5] Gas Diffusion Layer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

ساختارهای آب‌بندی در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون نقش حیاتی در بهبود عملکرد و افزایش طول عمر این سیستم‌ها دارند. با توجه به اهمیت تجاری‌سازی این فناوری، توسعه ساختارهای آب‌بندی که بتوانند هزینه‌های تولید را کاهش داده و عملکرد مطلوبی ارائه دهند، ضروری است. تحقیقات در زمینه مواد جدید و طراحی‌های بهینه برای ساختارهای آب‌بندی می‌تواند به توسعه پیل‌های سوختی با کارایی بالاتر و هزینه کمتر منجر شود. این مقاله به بررسی ساختارهای آب‌بندی در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC[6]) می‌پردازد و هدف آن شناسایی و تحلیل مزایا و معایب هر یک از روش‌های آب‌بندی، از جمله آب‌بندی مستقیم غشا، آب‌بندی غشا با قاب پلاستیکی، آب‌بندی غشاء پلیمری با قاب و آب‌بندی قاب محافظ صلب است. همچنین، نتایج تحقیقات و اختراعات اخیر در این حوزه مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهاداتی برای بهبود عملکرد سیستم‌های آب‌بندی ارائه می‌شود. با ارائه یک تحلیل جامع از چالش‌ها و فرصت‌های موجود در زمینه آب‌بندی در پیل‌های سوختی، این مقاله می‌تواند به محققان و مهندسان کمک کند تا راهکارهای موثری برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد پیل‌های سوختی پیدا کنند و به پیشرفت فناوری‌های مرتبط با انرژی پاک و پایدار کمک نمایند. این مطالعه نه تنها به توسعه علمی این حوزه می‌انجامد بلکه می‌تواند به تجاری‌سازی بهتر پیل‌های سوختی و ارتقای کارایی آنها در کاربردهای مختلف منجر شود.

۲- انواع ساختارهای نشت‌بندی MEA

در این بخش، به معرفی و بررسی چهار نوع اصلی ساختارهای نشت‌بندی در مجموعه الکترود غشایی (MEA) پرداخته می‌شود. این ساختارها شامل نشت‌بندی مستقیم غشا، نشت‌بندی غشا با قاب پلاستیکی، نشت‌بندی MEA با قاب، و نشت‌بندی قاب محافظ صلب هستند. هر یک از این روش‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فرد خود است که می‌تواند بر عملکرد نهایی پیل سوختی تأثیرگذار باشد.

۲-۱- نشت‌بندی مستقیم غشا (PEM)

در ساختار نشت‌بندی مستقیم غشا، غشای تبادل پروتون (PEM) به گونه‌ای طراحی می‌شود که اندازه آن بزرگتر از لایه‌های نفوذ گاز (GDLs) باشد. این افزایش اندازه به نحوی است که غشا فراتر از ناحیه فعال پیل گسترش یافته و لبه‌هایی را برای نشت‌بندی در اطراف پیل ایجاد می‌کند. مواد نشت‌بندی مانند واشرهای لاستیکی، فیلم‌های PTFE یا مواد ترموپلاستیک بر روی هر دو طرف این لبه‌های غشا قرار می‌گیرند و هنگامی که پیل سوختی مونتاژ می‌شود، این مواد با نیروی فشاری به هم چسبیده و ساختار نشت‌بندی را تشکیل می‌دهند [۱۱].

یکی از مزایای این روش، سادگی طراحی و سهولت مونتاژ و بازگشایی مجدد آن است. با این حال، به دلیل تماس مستقیم مواد نشت‌بندی با غشا، باید اطمینان حاصل شود که مواد استفاده‌شده هیچ‌گونه آسیبی به غشا وارد نمی‌کنند. در غیر این صورت، ممکن است باعث ترک‌خوردگی یا پارگی غشا شوند که نشت گازهای سوخت و اکسیدکننده را به همراه خواهد داشت [۱۱]. به علاوه، این نوع نشت‌بندی به دلیل تماس مستقیم با غشا، نیازمند موادی است که بتوانند تحمل فشار و دماهای بالا را بدون ایجاد آسیب داشته باشند. همچنین، مشکل دیگری که ممکن است در این نوع نشت‌بندی رخ دهد، مربوط به اعمال نیروی فشاری بیش از حد است که می‌تواند به تخریب مکانیکی لایه‌های غشا منجر شود. بنابراین، باید تنظیم دقیقی از نیروی فشاری برای مونتاژ پیل سوختی وجود داشته باشد تا از بروز این مشکلات جلوگیری شود [۱۳].

۲-۲- نشت‌بندی غشا با قاب پلاستیکی

ساختار نشت‌بندی غشا با قاب پلاستیکی یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای افزایش استحکام و یکپارچگی نشت‌بندی در پیل‌های سوختی است. در این روش، غشای تبادل پروتون (PEM) به گونه‌ای طراحی می‌شود که لبه‌های آن از ناحیه فعال فراتر رفته و قاب پلاستیکی برای محافظت و نشت‌بندی در اطراف آن قرار می‌گیرد [۱۲]. این قاب پلاستیکی معمولاً از طریق فرآیند قالب‌گیری تزریقی بر روی غشا نصب می‌شود و به یکپارچگی بیشتر ساختار MEA کمک می‌کند.

یکی از مزایای این روش، این است که قاب پلاستیکی می‌تواند نه تنها از نشت گاز به خارج جلوگیری کند، بلکه از مخلوط شدن گازهای سوخت و اکسیدکننده در داخل پیل نیز جلوگیری می‌کند. مواد استفاده‌شده برای قالب‌گیری تزریقی معمولاً شامل پلیمرهای ترموپلاستیک یا ترموستات، لاستیک ولکانیزه یا رزین‌های پخت سرد است [۱۲]. این مواد باید خواصی نظیر مقاومت در برابر حرارت و فشار، انعطاف‌پذیری مناسب و عدم تأثیر منفی بر غشا داشته باشند.

یکی از چالش‌های اصلی در این روش، نیاز به ابزار دقیق برای قالب‌گیری تزریقی و تنظیم دقیق دما و فشار در این فرآیند است. دمای بالا و فشار زیاد می‌تواند به غشا آسیب برساند و باعث ترک‌خوردگی یا پارگی آن شود. علاوه بر این، این ساختار به دلیل قالب‌گیری یکپارچه می‌تواند مشکلاتی در هنگام تعمیر و بازگشایی پیل سوختی به همراه داشته باشد، چرا که امکان جدا کردن قطعات به راحتی وجود ندارد [۱۳].

۲-۳- نشت‌بندی MEA با قاب

در این روش، مجموعه الکترود غشایی (MEA) به صورت کامل یا جزئی با قاب‌هایی پیچیده می‌شود که عمدتاً از مواد چسبناک یا قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند. این قاب‌ها معمولاً ناحیه غیرفعال پیرامون بخش فعال MEA را می‌پوشانند و به عنوان اجزای اصلی ساختار نشت‌بندی عمل می‌کنند. یکی از ویژگی‌های کلیدی این روش، استفاده از مواد تزریقی برای ساخت قاب‌ها است که می‌توانند به راحتی شکل دلخواه را به خود بگیرند و بر روی MEA قرار گیرند [۱۲].

مواد مورد استفاده در این روش شامل پلیمرهای ترموپلاستیک و رزین‌های پخت سریع یا تزریقی هستند که در حین فرآیند فشرده‌سازی تحت دما و فشار بالا به MEA چسبیده و ساختار نشت‌بندی یکپارچه‌ای را ایجاد می‌کنند. مزیت این روش در این است که علاوه بر جلوگیری از نشت گاز به خارج، اتصالات بسیار قوی‌ای بین قاب و لایه‌های انتشار گاز و کاتالیستی ایجاد می‌شود که موجب افزایش دوام و عملکرد MEA می‌گردد [۱۳].

[6] Proton Exchange Membrane Fuel Cell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

با این حال، این روش نیز مانند روش‌های دیگر دارای چالش‌هایی است. برای مثال، مواد تزریقی ممکن است به لایه‌های متخلخل MEA نفوذ کنند و باعث تضعیف مکانیکی آنها شوند. همچنین، دما و فشارهای بالای فرآیند تزریقی می‌تواند به غشا و لایه‌های انتشار گاز آسیب برساند، لذا تنظیم دقیق این پارامترها در فرآیند تولید ضروری است [۱۳].

۲-۴- نشت‌بندی قاب محافظ صلب

در ساختار نشت‌بندی قاب محافظ صلب، از قاب‌های مقاوم ساخته‌شده از مواد صلب نظیر پلی‌اتیلن نافتالات (PEN) یا پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) استفاده می‌شود که در اطراف مجموعه الکترود غشایی (MEA) قرار می‌گیرند. این قاب‌ها با سایر مواد ترموپلاستیک و مواد نشت‌بندی ادغام می‌شوند تا یکپارچگی ساختار نشت‌بندی حفظ شود [۱٤].

ویژگی اصلی این ساختارها، توانایی تحمل فشارهای بالا در هنگام فشرده‌سازی پیل سوختی است. قاب‌های محافظ صلب می‌توانند از تخریب و فشردگی بیش از حد غشا و لایه‌های انتشار گاز جلوگیری کنند و مانع از آسیب‌دیدگی مکانیکی اجزای داخلی پیل شوند. با این حال، پیچیدگی در طراحی و تولید این قاب‌ها باعث شده است که هزینه‌های تولید و فرآیند مونتاژ این ساختارها نسبت به دیگر روش‌ها بالاتر باشد [۱٤].

یکی دیگر از چالش‌های این روش، نیاز به مواد بسیار دقیق و سازگار برای جلوگیری از نشت گازها از طریق شکاف‌های بین قاب و سایر اجزای پیل است. علاوه بر این، در برخی موارد، قاب‌های صلب ممکن است با سایر اجزای پیل به خوبی سازگار نباشند و باعث ایجاد مقاومت‌های الکتریکی یا حرارتی شوند [۱۵].

۳- مقایسه ساختارهای نشت‌بندی

در این بخش، مقایسه‌ای بین چهار نوع اصلی ساختارهای نشت‌بندی که در بخش قبلی معرفی شدند انجام خواهد شد. این مقایسه شامل تحلیل مزایا و معایب هر یک از این ساختارها و همچنین بررسی نتایج تحقیقات و اختراعات اخیر مرتبط با آنها است. هدف از این مقایسه، شناسایی بهترین روش‌های نشت‌بندی برای بهینه‌سازی عملکرد پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC) است.

۳-۱- تحلیل مزایا و معایب هر نوع نشت‌بندی

نشت‌بندی مستقیم غشا (PEM) به عنوان یکی از روش‌های متداول در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون، دارای مزایا و معایبی است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از مزایای این روش، سادگی طراحی و فرآیند تولید آن است. به دلیل استفاده از مواد ساده‌ای مانند واشرهای لاستیکی و یا فیلم‌های ترموپلاستیک، فرآیند تولید این نوع نشت‌بندی نسبتاً ساده و سریع است. همچنین، مونتاژ پیل با این روش به‌سرعت انجام می‌شود و باز و بسته کردن آن آسان است، که این ویژگی به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم دارند، بسیار مفید است [۱۱]. علاوه بر این، هزینه‌های مرتبط با این نوع نشت‌بندی به دلیل استفاده از مواد ارزان‌قیمت و فرآیند تولید ساده، کمتر از سایر روش‌ها می‌باشد. با این حال، این نوع نشت‌بندی دارای معایبی نیز هست. یکی از چالش‌های عمده آن، حساسیت به فشار است؛ در این نوع نشت‌بندی، مواد نشت‌بندی مستقیماً با غشا تماس دارند و این تماس می‌تواند منجر به تخریب مکانیکی غشا شود. به عنوان مثال، نیروی فشاری بیش از حد می‌تواند باعث ترک‌خوردگی یا پارگی غشا شود که در نتیجه به نشت گازها و کاهش عملکرد پیل منجر می‌شود [۱۲]. همچنین، به دلیل تماس مستقیم مواد با غشا، عمر مفید این نوع نشت‌بندی نسبتاً کوتاه است و ممکن است نیاز به تعویض دوره‌ای داشته باشد.

نشت‌بندی غشا با قاب پلاستیکی به‌عنوان یکی دیگر از روش‌های طراحی پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون، از مزایا و معایبی برخوردار است که توجه به آنها در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های سوختی حائز اهمیت است. یکی از مزایای عمده این روش، یکپارچگی بیشتر آن می‌باشد. به دلیل فرآیند قالب‌گیری تزریقی، قاب پلاستیکی به‌صورت یکپارچه با غشا ترکیب می‌شود که این ویژگی موجب جلوگیری از نشت گازها و افزایش ایمنی در عملکرد پیل می‌گردد. ساختار حاصل از این روش به‌دلیل استحکام و پایداری بالاتر، برای کاربردهای طولانی‌مدت بسیار مناسب است و می‌تواند عمر مفید سیستم را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۱۳]. علاوه بر این، فرآیند قالب‌گیری تزریقی به تولید انبوه کمک کرده و به‌ویژه برای تولید پیل‌های سوختی در مقیاس وسیع، گزینه‌ای کارآمد به شمار می‌آید. این فرآیند امکان کاهش هزینه‌های تولید را فراهم می‌کند و به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که به بازارهای بزرگتر و رقابتی‌تری وارد شوند. با این حال، این روش نیز چالش‌هایی را به همراه دارد. یکی از معایب اصلی، پیچیدگی فرآیند تولید است؛ قالب‌گیری تزریقی نیاز به ابزار دقیق و شرایط کنترل‌شده‌ای دارد که می‌تواند فرآیند تولید را پیچیده و هزینه‌بر کند. به علاوه، در صورت خرابی قطعات، تعمیر آن‌ها دشوار خواهد بود و این می‌تواند به افزایش هزینه‌ها و زمان تعمیرات منجر شود. علاوه بر این، مشکل دیگری که در این روش وجود دارد، مربوط به جداسازی قطعات است. به دلیل یکپارچگی ایجادشده بین قاب و غشا، جدا کردن قطعات در صورت نیاز به تعمیر دشوار بوده و ممکن است نیاز به تعویض کامل قاب پلاستیکی داشته باشد [۱۳]. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که سیستم نیاز به نگهداری مداوم دارد، می‌تواند به چالش‌های جدی منجر شود و منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی گردد. بنابراین، تحقیق و توسعه در زمینه بهینه‌سازی این روش و کاهش چالش‌های موجود، از اهمیت بالایی برخوردار است.

یکی از روش‌های مؤثر در طراحی پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون، نشت‌بندی MEA با قاب می‌باشد که با ویژگی‌های خاص خود، در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های سوختی نقشی اساسی ایفا می‌کند. یکی از مزایای اصلی این روش، انعطاف‌پذیری در طراحی است. در این نوع نشت‌بندی، قاب‌ها می‌توانند به‌صورت کامل یا جزئی بر روی غشا قرار گیرند، که این امر امکان طراحی ساختارهای مختلف را به‌راحتی فراهم می‌آورد. همچنین، این ساختار از مواد چسبنده برای ایجاد اتصالات محکم و نشت‌بندی استفاده می‌کند که به دوام و عملکرد بهتر پیل کمک می‌کند [۱۴]. این نوع نشت‌بندی به‌ویژه در کاربردهای صنعتی که نیاز به تنوع در طراحی و عملکرد دارند، مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین، امکان تزریق مواد مختلفی نظیر رزین‌ها و پلیمرهای پیشرفته در این روش وجود دارد که به‌ویژه مقاومت بالایی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

در برابر حرارت و فشار دارند. با این حال، این روش چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. یکی از معایب عمده آن، احتمال نفوذ مواد تزریقی به لایه‌های غشا است. در برخی موارد، این مواد ممکن است به لایه‌های متخلخل MEA نفوذ کرده و باعث تضعیف مکانیکی آن شوند. این امر می‌تواند در طولانی‌مدت به کاهش عمر مفید سیستم منجر شود [۱۴]. علاوه بر این، هزینه تولید این نوع نشت‌بندی به دلیل پیچیدگی در فرآیند تزریق و استفاده از مواد پیشرفته، معمولاً بالاتر از روش‌های ساده‌تر مانند نشت‌بندی مستقیم غشا است. بنابراین، با وجود مزایای قابل توجه، نیاز به تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی این روش و کاهش چالش‌های مرتبط با آن وجود دارد.

نشت‌بندی قاب محافظ صلب نیز به‌عنوان یک روش پیشرفته و کارآمد در طراحی پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون، از ویژگی‌ها و چالش‌های خاصی برخوردار است که در ارزیابی عملکرد و پایداری این سیستم‌ها اهمیت بسزایی دارد. یکی از ویژگی‌های برجسته این نوع نشت‌بندی، توانایی آن در تحمل فشارهای فشاری بالا است. قاب‌های صلب به‌گونه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند که قادر به تحمل فشارهای زیادی بوده و از تخریب غشا و سایر اجزا جلوگیری می‌کنند. این خصوصیت به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به پایداری و عملکرد طولانی‌مدت دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۵]. علاوه بر این، قاب‌های محافظ صلب به‌طور مؤثری از غشا در برابر فشردگی بیش از حد و تغییر شکل‌های مکانیکی محافظت می‌کنند و به این ترتیب، موجب افزایش طول عمر سیستم و بهبود کارایی آن می‌شوند. با این حال، این روش نیز با چالش‌هایی همراه است. یکی از مشکلات عمده، پیچیدگی و هزینه بالای تولید قاب‌های صلب است. برای تولید این قاب‌ها، نیاز به استفاده از مواد گران‌قیمت و فرآیندهای پیچیده‌ای وجود دارد که می‌تواند هزینه‌های تولید را به‌شدت افزایش دهد. همچنین، این روش به ابزارهای دقیق و زمان بیشتری برای مونتاژ نیاز دارد، که خود می‌تواند به افزایش هزینه‌های کلی سیستم منجر شود [۱۵]. علاوه بر این، یکی از معایب دیگر این روش، احتمال بروز مشکلات در هماهنگی قاب‌های صلب با سایر اجزای پیل است. در برخی موارد، این قاب‌ها ممکن است به خوبی با دیگر اجزای پیل همخوانی نداشته باشند و به‌طور غیرمستقیم موجب ایجاد مقاومت‌های الکتریکی و حرارتی شوند. این موضوع می‌تواند به کاهش کارایی نهایی پیل سوختی و افزایش هزینه‌های عملیاتی منجر گردد. بنابراین، به‌منظور افزایش کارایی و بهینه‌سازی عملکرد این نوع نشت‌بندی، نیاز به تحقیق و توسعه بیشتر در زمینه طراحی و مواد مورد استفاده در تولید قاب‌های محافظ صلب احساس می‌شود.

۳-۲- بررسی نتایج تحقیقات و اختراعات

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه بهینه‌سازی ساختارهای نشت‌بندی پیل‌های سوختی انجام شده است. این تحقیقات عمدتاً بر روی بهبود کیفیت مواد نشت‌بندی، کاهش هزینه‌ها و افزایش طول عمر سیستم متمرکز بوده‌اند. در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره می‌کنیم.

پیرامون تحقیق بر روی مواد جدید برای نشت‌بندی، تحقیقات اخیر نشان داده است که استفاده از مواد پیشرفته‌ای نظیر پلیمرهای کریستال مایع (LCPs) رزین‌های پلی‌سولفون و پلی‌اتیلن نافتالات (PEN) می‌تواند به بهبود مقاومت حرارتی و مکانیکی قاب‌های نشت‌بندی کمک کند. این مواد به دلیل داشتن خواص حرارتی و فشاری عالی، عملکرد بالاتری نسبت به مواد سنتی نشان داده‌اند [۱۲]. تحقیقات اخیر در زمینه بهینه‌سازی فرآیند قالب‌گیری تزریقی نشان داده است که استفاده از شرایط بهینه برای دما و فشار در حین تزریق می‌تواند به افزایش عمر مفید قاب‌های نشت‌بندی و جلوگیری از آسیب‌های مکانیکی به غشا کمک کند. برای مثال، نتایج تحقیق انجام‌شده توسط Adachi نشان داد که دمای پایین‌تر در فرآیند تزریق به کاهش ترک‌خوردگی در غشا منجر می‌شود [۱۳].

در مورد استفاده از قاب‌های محافظ صلب با ساختارهای میکروسکوپی نیز مطالعات گوناگونی صورت پذیرفته‌است. اخیراً، برخی از محققین قاب‌های محافظ صلب با ساختارهای میکروسکوپی ایجاد کرده‌اند که به جلوگیری از نشت گاز و افزایش دوام سیستم کمک می‌کند. این قاب‌ها دارای سطوح میکروساختاری هستند که به بهبود تماس بین اجزا و کاهش نشت گازها کمک می‌کند [۱۴].

روش‌های نوین تولید و مونتاژ قاب‌های نشت‌بندی، نظیر استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی برای تولید قاب‌های نشت‌بندی، به دلیل کاهش هزینه‌ها و انعطاف‌پذیری در طراحی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تحقیقات نشان داده است که استفاده از این فناوری می‌تواند به تولید سریع‌تر و ارزان‌تر قاب‌های پلاستیکی کمک کند [۱۵].

۴- نتیجه و جمع بندی

نتایج بررسی‌ها و تحلیل‌های مربوط به ساختارهای آب‌بندی در پیل‌های سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC) نشان می‌دهد که این ساختارها نقش کلیدی در عملکرد الکتریکی و ایمنی این پیل‌ها دارند. در این مطالعه، چهار نوع اصلی ساختار آب‌بندی بررسی شد: آب‌بندی مستقیم غشا، آب‌بندی غشا با قاب پلاستیکی، آب‌بندی MEA با قاب، و آب‌بندی قاب محافظ صلب. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و چالش‌های خاص خود هستند. آب‌بندی مستقیم غشا به دلیل سادگی در تولید و هزینه کم، انتخاب مناسبی برای کاربردهای با بودجه محدود است؛ اما حساسیت بالای آن به فشار و تماس مستقیم با غشا می‌تواند به تخریب مکانیکی منجر شود. آب‌بندی غشا با قاب پلاستیکی، یکپارچگی و دوام بالاتری دارد و برای تولید انبوه مناسب است؛ با این حال، پیچیدگی و هزینه بالای تولید آن از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. آب‌بندی MEA با قاب امکان استفاده از مواد مختلف و انعطاف‌پذیری در طراحی را فراهم می‌کند؛ با این حال، فرآیند تولید پیچیده و نیاز به تنظیم دقیق پارامترها از مشکلات آن است. آب‌بندی قاب محافظ صلب توانایی تحمل فشارهای بالا را دارد و از تخریب اجزا جلوگیری می‌کند، اما تولید آن نیاز به فرآیندهای پیچیده و هزینه‌بر دارد. در مجموع، هیچ یک از ساختارهای آب‌بندی به‌تنهایی مزیت کامل ندارند، اما به نظر می‌رسد که ساختارهای آب‌بندی یکپارچه که در فرآیند قالب‌گیری تزریقی ساخته می‌شوند، از پتانسیل بیشتری برخوردارند. همچنین، قاب‌های محافظ صلب با توجه به محافظت از غشا در برابر فشارهای بالا، نقش مهمی در جلوگیری از آسیب دیدن مجموعه الکترودی غشایی دارند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

پیشنهادات توسعه‌ای شامل استفاده از مواد پیشرفته مانند پلیمرهای کریستال مایع و رزین‌های پخت سریع برای بهبود دوام و مقاومت حرارتی سیستم‌های آب‌بندی، بهینه‌سازی فرآیند قالب‌گیری تزریقی و استفاده از فناوری‌های نوین تولید مانند چاپ سه‌بعدی برای کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت تولید است. علاوه بر این، تحقیق در زمینه بهبود اتصالات بین قاب و غشا و توسعه روش‌های مونتاژ خودکار می‌تواند به بهبود کیفیت و کارایی سیستم‌های آب‌بندی کمک کند. کاهش مقاومت‌های الکتریکی و حرارتی در قاب‌های محافظ صلب از دیگر اولویت‌های پژوهشی است که می‌تواند به بهبود عملکرد پیل‌های سوختی منجر شود. بهبود ساختارهای آب‌بندی و تحقیق بر روی مواد جدید می‌تواند به افزایش کارایی پیل‌های سوختی کمک کرده و راه را برای تجاری‌سازی این تکنولوژی باز کند.

مراجع

1- Jao TC, Jung GB, Chi PH, Ke ST, Chan SH. Power Sources. J Power Sources. 2011;196:1818–25.

2- O'Hayre RP, Cha SW, Colella W. Fuel Cell Fundamentals. John Wiley & Sons; 2006.

3- Qiu D, Liang P, Peng L, Yi P, Lai X, Ni J. Material behavior of rubber sealing for proton exchange membrane fuel cells. Int J Hydrogen Energy. 2020;45(8):5465–73.

4- Wu F, Chen B, Yan Y, Chen Y, Pan M. Degradation of silicone rubbers as sealing materials for proton exchange membrane fuel cells under temperature cycling. Polymers. 2018;10:522.

5- Liang P, Qiu D, Peng L, Yi P, Lai X, Ni J. Structure failure of the sealing in the assembly process for proton exchange membrane fuel cells. Int J Hydrogen Energy. 2017;42(15):10217–27.

6- Cui T, Chao YJ, Van Zee JW. Stress relaxation behavior of EPDM seals in polymer electrolyte membrane fuel cell environment. Int J Hydrogen Energy. 2012;37(18):13478–83.

7- Graiver D, Farminer KW, Narayan R. A review of the fate and effects of silicones in the environment. J Polym Environ. 2003;11:129–36.

8- Pan W, Chen Z, Chen X, Wang F, Dai G. Analytical and numerical investigation of flow distribution in PEMFC stacks. Chem Eng J. 2022;450:137598.

9- Barbir F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Elsevier Academic Press; 2005.

10- Lin CW, Chien CH, Tan J, Chao YJ, Van Zee J. Power Sources. J Power Sources. 2011;196:1955–66.

11- Dillard DA, Guo S, Ellis MW, Lesko JJ, Dillard JG, Sayre J, et al. ASME 2004 2nd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology; 2004.

12- Schmid O, Einhart J. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells and Stacks with Adhesively Bonded Layers. US Patent 6,080,503; 2000.

13- Yandrasits MA, Hicks MT, Pierpont DM. Manufacturing of Fuel Cell Membrane Electrode Assemblies Incorporating Photocurable Cationic Crosslinkable Resin Gasket. WO Patent WO/2009/082,584; 2009.

14- Adachi M. Sealing Material for Fuel Cell. US Patent 6,451,468; 2002.

15- Nanaumi M, Nakanishi JY, Nishiyama T. Membrane Electrode Assembly and Fuel Cell. US Patent 7195838B2; 2007.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]