POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

Y. Wang, B. Seo, B. Wang, N. Zamel, K. Jiao, X. Cordobes Adroher, Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology, *Energy and AI*, 1, 100014, 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100014

اصول، مواد و یادگیری ماشین فناوری پیل سوختی غشای الکترولیت پلیمری

چکیده

پیل‌های سوختی غشای الکترولیت پلیمری (PEM)[1] تجهیزات الکتروشیمیایی هستند که به طور مستقیم انرژی شیمیایی ذخیره‌شده در سوخت را به انرژی الکتریکی با راندمان تبدیل عملی، به اندازهٔ 65٪ تبدیل می‌کنند. در سال‌های گذشته، پیشرفت قابل توجهی در تجاری‌سازی پیل سوختی PEM صورت گرفته است. تا سال 2019، بیش از 19000 خودروی الکتریکی پیل سوختی (FCEV)[2] و 340 ایستگاه سوخت‌گیری با هیدروژن (HRF)[3] در ایالات متحده (به ترتیب حدود 8000 و 44)، ژاپن (به ترتیب حدود 3600 و 112)، کره جنوبی (به ترتیب حدود 5000 و 34)، اروپا (به ترتیب حدود 2500 و 140) و چین (به ترتیب حدود 110 و 12) وجود داشت. ژاپن، کره جنوبی و چین قصد دارند تا سال 2030 حدود 3000 ایستگاه HRF بسازند. در سال 2019، هیوندای نکسو و تویوتا میرای حدود 63٪ و 32٪ از کل فروش را به خود اختصاص دادند، که برد رانندگی آنها به ترتیب 380 و 312 مایل و همچنین 65 و 67 مایل در گالن (MPGe)[4] بود. اصول اولیهٔ پیل‌های سوختی PEM نقش مهمی در پیشرفت فناوری برای بهبود عملکرد/ دوام پیل سوختی و کاهش هزینه ایفا می‌کند. چندین جنبهٔ کلیدی برای طراحی پیل سوختی، کنترل عملیاتی و توسعهٔ مواد، مانند دوام، مواد الکتروکاتالیست، مدیریت آب و حرارتی، عملیات دینامیکی و شروع سرد[5]، به طور خلاصه در این کار توضیح داده شده است. یادگیری ماشین و هوش مصنوعی (AI)[6] در توسعهٔ مواد/ انرژی، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این بررسی همچنین در مورد کاربردها و پتانسیل آنها در توسعهٔ دانش و همبستگی‌های اصولی، انتخاب و بهبود مواد، طراحی و بهینه‌سازی پیل، کنترل سیستم، مدیریت توان و نظارت بر سلامت عملیات پیل‌های سوختی PEM، همراه با فیزیک اصلی در پیل‌های سوختی PEM برای یادگیری ماشین مبتنی بر فیزیک بحث می‌کند. هدف این مقاله، بررسی سه

---

1 Polymer electrolyte membrane (PEM)
2 Fuel cell electric vehicles (FCEV)
3 Hydrogen refueling (HRF)
4 Mile per gallon (MPGe)
5 Cold start
6 Artificial intelligence (AI)

مورد است: (1) ارائهٔ آخرین وضعیت از کاربردهای پیل سوختی PEM در بخش‌های قابل حمل[7]، ثابت و حمل و نقل؛ (2) توصیف اصول مهم برای پیشرفت بیشتر فناوری پیل سوختی از نظر طراحی و کنترل بهینه سازی، کاهش هزینه و بهبود دوام و (3) توضیح یادگیری ماشین، یادگیری عمیق مبتنی بر فیزیک و روش‌های AI و توصیف پتانسیل‌های قابل توجه آنها در تحقیق و توسعهٔ (R&D)[8] پیل سوختی PEM.

خلاصه و اظهارات پایانی

در این بررسی، ما آخرین وضعیت پیل‌های سوختی PEM را در کاربردهای قابل حمل، ثابتِ کوچک و حمل و نقل خلاصه نموده‌ایم، اصول مهم مرتبط با مواد پیل سوختی، طراحی، کنترل و دوام را مورد بحث قرار دادیم و یادگیری تجهیزات، یادگیری عمیق مبتنی بر فیزیک و هوش مصنوعی (AI) در کاربردهای انرژی و پتانسیل‌های بزرگ آنها در پیشرفت فناوری PEMFC[9] توضیح داده شده است.

از دسامبر 2019، بیش از 19000 FCEV تجاری در ایالات متحده، ژاپن، کره جنوبی، اروپا و چین مستقر شده‌اند و بیش از 340 ایستگاه HRF برای خدمات‌رسانی به این FCEVها در دسترس بود. هیوندای نکسو و تویوتا میرای دو مدل FCEV هستند و در سال 2019 به ترتیب حدود 63٪ و 32٪ از کل فروش را به خود اختصاص داده‌اند. تا سال 2030، ژاپن، کره جنوبی و چین قصد دارند به ترتیب حدود 0/85، 0/8 و 1 میلیون FCEV را به کار گیرند و حدود 1200، 900 و 1000 ایستگاه HRF بسازند. درایالات متحده، بیش از 30 عدد اتوبوس الکتریکی پیل سوختی[10] (FCEB) کار می‌کند که تا سال 2017 به حدود 17 میلیون مسافر خدمات‌رسانی نموده‌اند. اکثر آنها به هدف نهایی 25000 ساعت دست یافته‌اند یا تقریباً به آن رسیده‌اند. در اروپا، نمایش حدود 100 FCEB در سراسر این قاره با دستیابی به 35000 ساعت توسط یک دسته پیل سوختی[11] شرکت بالارد[12] به پایان رسید. در بخش قابل حمل، واحدهای پیل سوختی PEM به‌عنوان شارژر الکتریکی و منابع توان برای هواپیماهای بدون سرنشین، پوشیدنی‌ها[13] و اهداف نظامی توسعه داده شده‌اند. توان پشتیبان‌گیری[14] و تولید توان ثابت کوچک[15] پیل‌های سوختی PEM در سال‌های اخیر به سرعت در حال رشد

---

7 Portable
8 Research and development (R&D)
9 (PEM) fuel cells (PEMFCs)
10 Fuel cell electric bus (FCEB)
11 Fuel cell stack
12 Ballard
13 Wearables
14 backup power
15 small stationary power generation

بوده است. واحدهای پیل سوختی Co-gen (تولیدهمزمان برق و گرما توسط پیل سوختی) می‌توانند به بیش از 80٪ بازدهی برای بهره‌برداری از توان و انرژی حرارتی برسند.

با وجود پیشرفت زیاد در تجاری‌سازی، همچنان دو مانع اصلی برای استقرار در سراسر جهان، هزینه و دوام است. دستیابی به هدف دوام، تحت هدف بارگذاری فلزات گروه پلاتین (PGM)[16] توسط وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)[17] چالش برانگیز است. اگرچه FCEV و FCEBها به ترتیب با آزمون رانندگیِ واقعی، به 3000 ساعت و هدف نهایی 25000 ساعت دست یافته‌اند، اما هنوز بسیار گران‌تر از خودروهای معمولی مبتنی بر سوخت فسیلی هستند. قیمت تویوتا میرای، حتی پس از مشوق‌های بزرگ دولتی 100 تا 200 درصد بیشتر از یک خودروی بنزینی معمولی است. هزینهٔ فعلی یک FCEV تقریباً 45 دلار/ کیلووات است که حدود 50 ٪ بیشتر از هدف نهایی DOE (30 دلار/ کیلووات) است. یک FCEB در حال حاضر تقریباً 1 میلیون دلار هزینه دارد، حتی در حجم تولید 40.

اصول اساسی در غلبه بر موانع اصلی و پیشرفت بیشتر فناوری پیل سوختی PEM برای عملکرد بالا، بسیار مهم است. مواد جدید PEM، بارگذاری کم PGM و کاتالیزورهای غیر PGM برای کاهش هزینه پیل سوختی مهم هستند. جریان دو فازی در اجزای متخلخل مانند لایه‌های کاتالیزور (CLs)[18]، لایه‌های نفوذ گاز (GDLs)[19] و کانال‌های جریان گاز (GFCs)[20] باید به طور موثری برای اطمینان از عملکرد و دوام بالا، مدیریت شود. برای استراتژیِ کنترل و نظارت بر سلامت، دینامیک پیل سوختی باید در عمل درک شود. قابلیت شروع سرد برای حمل و نقل و کاربردهای قابل حمل در محیط‌های یخزده، که نیاز به فیزیک تولید یخ و رفتارهای حرارتی شامل تغییر فاز و برهمکنش آنها با واکنش الکتروشیمیایی دارد، مهم است.

یادگیری ماشین و هوش مصنوعی (AI) ابزار قدرتمندی برای تحقیق و توسعهٔ انرژی و مواد هستند و در سال‌های اخیر به سرعت در حال رشد بوده‌اند. یادگیری ماشین و AI پتانسیل زیادی برای پیشرفت فناوری PEMFC برای کاهش هزینه و بهبود دوام/ عملکرد دارند و در بازدهی محاسبات و در نظر گرفتن اثرات فیزیک که هنوز ناشناخته‌اند یا فرمول‌بندی نشده‌اند، اما در پایگاه‌های دادهٔ آموزشی موجودند، سودمند هستند. آنها برای پیش‌بینی عملکرد PEMFC، بهینه‌سازی طراحی پیل و انتخاب/ بهینه‌سازی کاتالیزور اعمال شده‌اند و وعدهٔ بزرگی را در توسعهٔ همبستگی‌های بنیادی برای جریان دو فازی و خواص مواد، تجزیه و تحلیل تصاویر بصورت درجا/غیر درجا (ex-/in-situ) برای عملیات PEMFC نشان دادند و همچنین توسعهٔ مدل پیشرفته با استفاده از

---

[16] Pt group metal (PGM)
[17] Department of energy (DOE)
[18] Catalyst layers (CLs)
[19] Gas diffusion layers (GDLs)
[20] Gas flow channel (GFC)

POLYM PART
مرجع پلیمر در بازار ایران

داده‌های تصـــویربرداری یا یادگیری عمیق مبتنی بر فیزیک را تســـهیل نمودند، که می‌تولند معادلات جریان، همبســـتگی‌های فشـــار موینگی و پارامترهای بدون بعد را در شـــبکه‌های عصـــبی کدگذاری کند. آنها همچنین می‌توانند برای پیش‌بینی دینامیک پیل ســـوختی، نظارت وضـــعیت ســـلامت (SoH)[۲۱]/ عمر مفید باقیملنده (RUL)[۲۲] و افزایش دوام از طریق تجزیـه و تحلیـل داده‌هـا در زمـان واقعی و ترکیـب ویژگی‌هـای دینـامیکی و پارامترهای کلیدی در یادگیری شـــبکه عصـــبی و کمک به توســـعهٔ اســـتراتژی‌های کنترل برای برآورد نیازهای بارگذاری، فعال کردن شـروع سـرد، بهینه‌سـازی عملیات بر اسـاس نظارت در زمان واقعی و کاهش تخریب مواد استفاده شوند. فیزیک و اصول اصلی در پیل‌های سوختی PEM برای یادگیری عمیق مبتنی بر فیزیک، همراه با منابع عمومی عمده از پایگاه‌های دادهٔ یادگیری ماشین و ابزارهای مواد و شیمی در این مقاله، خلاصه شده است.

[21] State of health (SoH)
[22] Remaining useful life (RUL)