پیل‌های سوختی ، قلب تپنده آینده انرژی

فردین محمودی – امیر صفاری نیا
عضو هیات علمی موسسه آموزش عالی مهرآیین بندرانزلی - مدیر گروه رشته برق
دانشجوی کارشناسی رشته برق

چکیده :
پیل‌های سوختی (Fuel Cells) فناوری پیشرفته‌ای هستند که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً و بدون احتراق به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. برخلاف باتری‌ها که انرژی ذخیره می‌کنند، پیل‌های سوختی با تامین مداوم سوخت و اکسیدان، به تولید پیوسته برق می‌پردازند. این فناوری با بازده بالا، انتشارات نزدیک به صفر و تطبیق‌پذیری گسترده، به عنوان یکی از ستون‌های اصلی سیستم‌های انرژی پاک در آینده شناخته می‌شود.

کلمات کلیدی: پیل سوختی ، انرژی تجدید پذیر ، سوختهای فسیلی

اصل عملکرد: الکتروشیمی به جای احتراق
اساس کار پیل سوختی بر واکنش الکتروشیمیایی ترکیب هیدروژن و اکسیژن استوار است:
آند (اکسیداسیون): ۲ $H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
کاتد (کاهش) $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$:
واکنش کلی: ۲ $H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ + انرژی الکتریکی + حرارت
اجزای اصلی هر پیل سوختی:
آند: محل تزریق سوخت) معمولاً (H_2 و انجام واکنش اکسیداسیون.
کاتد: محل تزریق اکسیدان) معمولاً O_2 از هوا (و انجام واکنش کاهش.
الکترولیت: محیطی یونی (اسیدی، بازی یا جامد) که فقط به یون‌ها اجازه عبور می‌دهد و الکترون‌ها را مجبور به حرکت در مدار خارجی (تولید جریان) می‌کند.
صفحات دوقطبی :(Bipolar Plates) هدایت جریان الکتریکی، توزیع گازها و خنک‌کاری.
کاتالیست: (معمولاً پلاتین یا آلیاژهای آن) تسریع واکنش‌های الکترودی.
انواع اصلی پیل‌های سوختی:
تفاوت عمده انواع پیل‌های سوختی در جنس الکترولیت و دمای کارکرد آنهاست:
نوع پیل سوختی مخفف الکترولیت دمای کار(°C) سوخت اصلی کاربردهای شاخص مزایا چالش‌ها
پیل سوختی غشای تبادل پروتون PEMFC پلیمر جامد اسیدی (مثل نفیون) 60-80 H_2 خالص
خودروهای برقی، ژنراتورهای قابل حمل راه‌اندازی سریع، چگالی توان بالا حساس به CO ، نیاز به H_2 خالص، هزینه کاتالیست
پیل سوختی قلیایی AFC محلول KOH 60-90 H_2 خالص فضاپیماها، زیردریایی‌ها بازده بالا، هزینه نسبی پایین حساس شدید به CO_2

پیل سوختی متانولی مستقیم DMFC پلیمر جامد) شبیه(PEM 60-90 متانول دستگاه های الکترونیکی قابل حمل استفاده از سوخت مایع چگالی توان پایین، نفوذ متانول
پیل سوختی فسفریک اسید PAFC اسید فسفریک مذاب ۱۸۰-۲۰۰ ,H_2گاز طبیعی تولید همزمان برق و حرارت(CHP) تحمل CO تا حدود ۱.۵٪ راه‌اندازی کند، وزن و حجم بالا
پیل سوختی کربنات مذاب MCFC کربنات‌های قلیایی مذاب ۶۰۰-۷۰۰ گاز طبیعی، بیوگاز نیروگاه‌های مقیاس متوسط بازده بسیار بالا، سوخت انعطاف‌پذیر خوردگی، طول عمر محدود
پیل سوختی اکسید جامد SOFC سرامیک اکسیدی) مثل(YSZ 800-1000گاز طبیعی، بیوگاز، دیزل نیروگاه‌های ثابت، CHP، APU سوخت بسیار انعطاف‌پذیر، بازده بالا، عدم نیاز به فلز نجیب راه‌اندازی بسیار کند، چالش‌های حرارتی

مزایای کلیدی پیل‌های سوختی:

بازده بالا: بازده تبدیل انرژی می‌تواند تا ۶۰ %و در سیستم‌های ترکیبی CHP تا ۸۵ (%برسد، بسیار بالاتر از موتورهای احتراق داخلی.(30-35%)

پاک‌سازی محیط زیست: محصول نهایی اصلی آب است. انتشار گازهای گلخانه‌ای (به ویژه اگر هیدروژن از منابع تجدیدپذیر تامین شود) و آلاینده‌های محلی (SO_x, NO_x,) ذرات (نزدیک به صفر است.

صدای کم: عملکرد بی‌صدا و بدون لرزش به دلیل عدم وجود قطعات متحرک اصلی.

چگالی انرژی بالا: به ویژه برای حمل و نقل (نسبت به باتری‌های لیتیومی فعلی) مزیت دارد. زمان سوخت‌گیری هیدروژن سریع‌تر از شارژ باتری است.

انعطاف‌پذیری در مقیاس: از تامین برق دستگاه‌های الکترونیکی کوچک (وات) تا نیروگاه‌های مگاواتی قابل توسعه هستند.

قابلیت تولید همزمان برق و حرارت :(CHP) حرارت تولیدی قابل استفاده برای گرمایش یا فرآیندهای صنعتی است.

چالش‌ها و موانع توسعه:

هزینه بالا: مواد اولیه گران‌قیمت) کاتالیست پلاتین در(PEMFC ، فرآیندهای ساخت پیچیده.

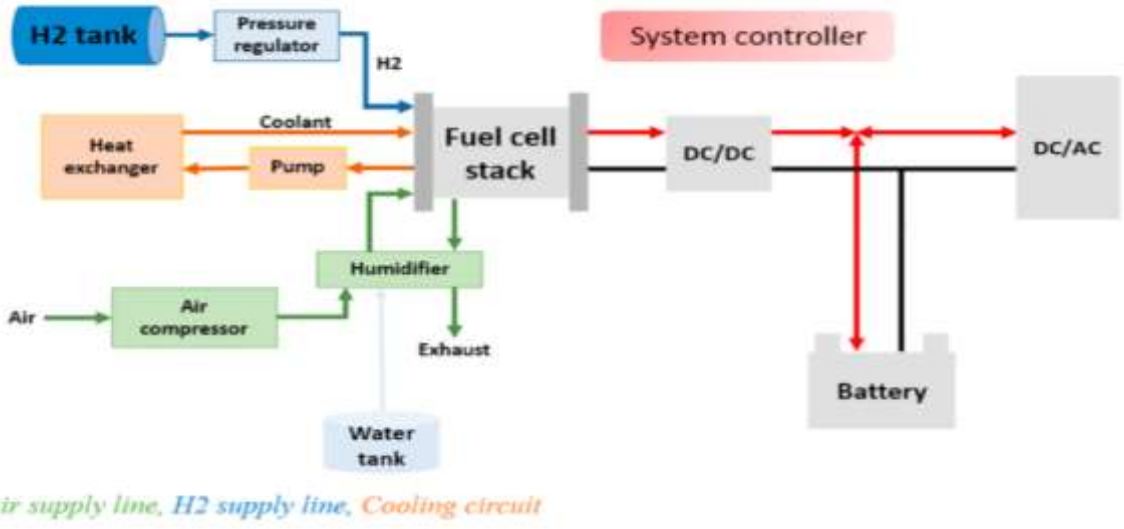
دوام و طول عمر: تخریب تدریجی اجزا (الکترولیت، کاتالیست) به ویژه در سیکل‌های راه‌اندازی/خاموش‌شدن.

توسعه زیرساخت هیدروژن: تولید، ذخیره‌سازی، انتقال و توزیع هیدروژن سبز به سرمایه‌گذاری عظیم نیاز دارد.

بسته سلول سوختی

یک سلول PEMFC عمدتاً از صفحات دوقطبی تشکیل شده است،لایه های انتشار گاز ، دو الکترود: آند و کاتد و غشایی بین هر دو الکترود. پشته پیل سوختی به اتصال پیوسته سلول اشاره دارد. سوخت به آند و اکسیدان به کاتد عرضه می شود. این غشا اجازه عبور یون های هیدروژن و مسدود شدن عبور الکترون ها را می دهد. اصل کار ساده است: یونهای هیدروژن از غشا به طرف آند عبور می کنند و الکترونها از طریق یک مدار خارجی جریان الکتریکی ایجاد می کنند. سالهاست که بسیاری از مطالعات نشان داده اند که پیل های سوختی به مرور زمان و بسته به شرایط کار تخریب می شوند [۱۱]. تخریب پیل سوختی به از دست دادن برگشت ناپذیر نیرویی اطلاق می شود که می تواند توسط بسته در یک نقطه عملیاتی معین تأمین شود. وضعیت سلامت را می توان از دست دادن توان پیل سوختی در شرایط عملیاتی نامی در مقایسه با مرجع اسمی در آغاز زندگی (BoL) تعریف کرد [۱۲]. مکانیسم های تجزیه می تواند در همه اجزای یک پیل سوختی رخ دهد: صفحات دوقطبی ، لایه های انتشار گاز ، الکترودها و غشاها [۱۳] (نک: جدول۱-۲). همانطور که در جدول ۱-۲ در بالا معرفی شد ، نه تنها زمان

کارکرد منجر به از دست دادن عملکرد می شود بلکه در صورت نامناسب بودن شرایط عملکرد نیز منجر می شود. در واقع ، مدیریت نادرست آب می تواند منجر به خشک شدن غشاء شود که سطوح مقاومتی را افزایش می دهد و می تواند باعث ایجاد ترک و سوراخ یا سیل سلول شود که تلفات جرم را افزایش می دهد. فیلتر نامناسب هوا می تواند منجر به مسمومیت توسط آلاینده ها و ناخالصی ها شود [۱۴] ، در حالی که مدیریت حرارتی بد و دمای زیر صفر می تواند منجر به تخریب مکانیکی شدید شود. با این حال ، از دست دادن عملکرد به طور سیستماتیک به معنای تخریب نیست زیرا می تواند بسته به شرایط عملکرد قابل برگشت باشد [۱۶،۱۵،۱۰]. به عنوان مثال ، تغییرات رطوبت مستقیماً بر مقدار مقاومت اهمی تأثیر می گذارد بدون اینکه برگشت ناپذیر باشد [۱۰].



شکل ۱-۲. شماتیک یک سیستم پیل سوختی ترکیبی معمولی و تعادل گیاهان.

جدول ۱-۲ مکانیسم های تخریب عمده سلول سوختی

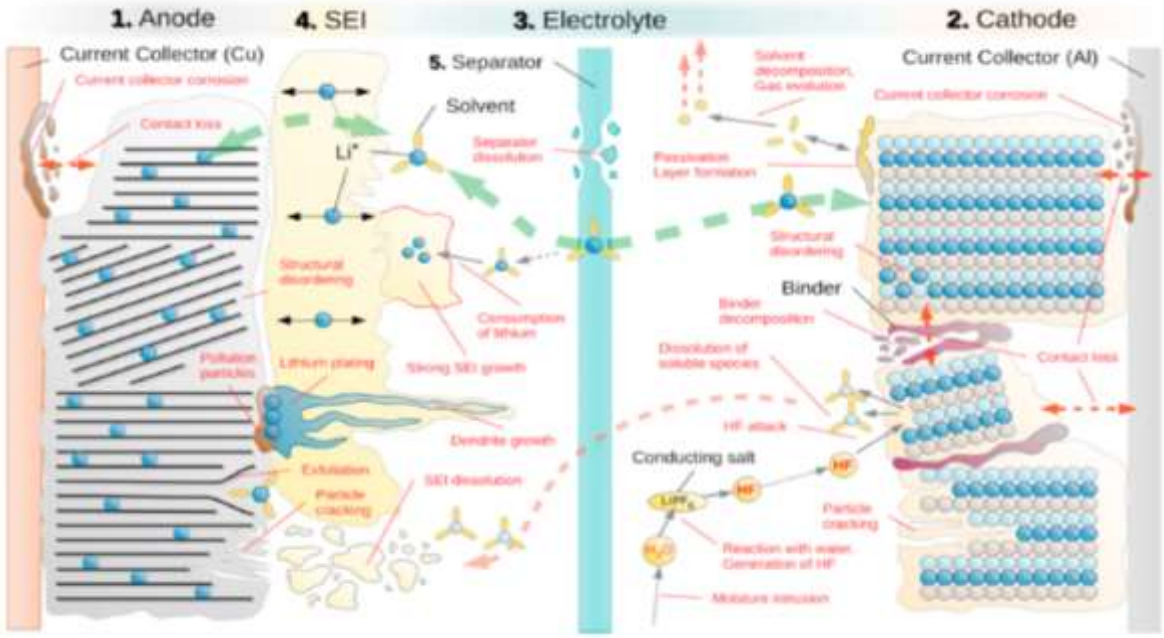
Component	Role	Degradation mechanisms	Causes
Membrane	Allow the protons travelling from anode to cathode; Block the travel of electrons; Participate to anode humidification;	Mechanical degradation (cracks and pinholes); Chemical degradation: poisoning;	Non-uniform pressure; Drying; Thermal stress/ cycling; Air impurities and fuel poisoning; Sealing; Peroxide attacks;
Bipolar plate	Isolating individual cells; Conduct the current between cells; Help in water and thermal management; Maintain mechanically the MEA; ensure good contact resistance;	loss of conductivity; Facture and deformation;	Corrosion; Mechanical stress and Thermal stress/cycling;
Electrodes = GDL + CL	Electrical conductor used for electrons travelling from anode to cathode;	Losses of activation and conductivity; Decrease of reactant diffusion;	Corrosion; Delamination; Oxidation; Flooding; Fuel poisoning; Mechanical stress;
Gas diffusion layers (GDL)	Ensure the gas diffusion from the flow fields to the active sites; Evacuate water;	Loss of hydrophobicity; Mechanical degradation;	Corrosion; Mechanical and thermal stress;
Catalyst layer (CL)	Assist the reactions of hydrogen oxidation and oxygen reduction;	Loss of conductivity; Loss of catalyst;	Corrosion; Mechanical and thermal stress;

سیستم های پیل سوختی که در خودرو یکپارچه شده اند ، تحت شرایط سخت کار می کنند [۵،۴] مانند تغییرات بار دینامیکی [۷،۶] ، ناخالصی های هوا ، تغییرات دما و رطوبت ، دمای سرد محیط [۸] و ارتعاشات و ضربه ها [۹] که می تواند تخریب اجزای سیستم را تسریع کند. توسعه الگوریتم های تشخیصی و پیش آگهی قابل اطمینان یک گام مهم برای کمک به استراتژی های مدیریت انرژی ، اطمینان از شرایط بهینه عملکرد و پیش بینی عمر مفید (RUL) سیستم است.

۲-۲-۲-باتری ها

واکنشهای شیمیایی که در یک سلول باتری اتفاق می افتد کاملاً شبیه واکنشهایی است که در یک سلول سوختی رخ می دهد. واکنش دهنده های واکنش های الکتروشیمیایی در سلول باتری ، مواد آند و کاتد هستند که هر دو ترکیباتی هستند که حاوی اتم های لیتیوم هستند. در حین تخلیه ، یک واکنش اکسیداسیون در آند باعث ایجاد یونهای لیتیوم با بار مثبت و الکترونهای با بار منفی می شود. سپس ، یونهای لیتیوم از طریق جدا کننده (غشاء) و الکترولیت و الکترونها از طریق یک مدار خارجی عبور می کنند. آنها سرانجام در کاتد همراه با مواد کاتد در یک واکنش احیا مجدد ترکیب می شوند. در حین شارژ ، نقش کاتد و آند در سطح الکترودهای منفی و مثبت معکوس می شود. مانند پیل سوختی ، مکانیسم های تخریب در داخل سلول باتری رخ می دهد [۱۷-۲۰]. Schlasza و

همکاران [۱۹] تصویری مفصل را پیشنهاد کرد (نگاه کنید به شکل ۲) که تمام مکانیسم های تخریب رخ داده در یک سلول باتری Li-ion را برجسته می کند.



شکل ۲-۲. مکانیسم های اصلی تخریب درون یک باتری لیتیوم یون [۱۹].

مکانیسم های تخریب عمده ای که در باتری با توجه به علل و پیامدهای آنها رخ می دهد. در مورد باتری ها، افت عملکرد را می توان از دو نظر تقسیم کرد: محو شدن قدرت و محو شدن ظرفیت. • ظرفیت باتری به مقدار کل بار الکتریکی که باتری می تواند تحویل دهد اشاره دارد. محو شدن ظرفیت معمولاً به عنوان نسبت بین ظرفیت موجود واقعی و ظرفیت موجود در ابتدای زندگی در شرایط مشابه کار تعریف می شود. ظرفیت موجود نیز بستگی به دمای باتری و بار فعلی دارد. • خاموش شدن قدرت به افزایش امپدانس داخلی اشاره دارد که منجر به کاهش قدرت موجود باتری می شود. قدرت موجود نیز بستگی به دما ، نرخ فعلی و وضعیت شارژ باتری دارد. به طور خلاصه ، مانند سلول های سوختی ، عملکرد باتری تحت تأثیر مکانیسم های تخریب قرار می گیرد (نگاه کنید به جدول ۲) و شرایط عملکرد [۲۱،۱۶]. باتری ها که در خودرو قرار دارند ، تحت پویایی جریان بالا و شرایط متغیر عملکرد قرار می گیرند. سپس ، ظرفیت باتری و امپدانس داخلی در طول عمر باتری متفاوت خواهد بود. بنابراین ، برای برآورد و پیش بینی وضعیت سلامت باتری (ظرفیت و امپدانس) لازم است تا اطلاعات خوبی در مورد خودمختاری موجود خودرو و توان تحویل داده شود.

۲-۲-۳-تعادل گیاه

پوکورشپان یکی از اولین نویسندگانی بود که روی سیستم پیل سوختی کامل تمرکز کرد و تعادل گیاه را در کنار پشته در نظر گرفت. او پایان نامه خود را بر اساس مدل سازی سیستم پیل سوختی [۲۲] و بر مدل سازی عملکرد پشته و BoP متمرکز کرد: کمپرسور هوا ، مرطوب کننده هوا ، کولر و غیره. همه مدلهای پیشنهادی بسیار دقیق و خوب هستند مکانیسم های تخریب در تمام اجزای سلول باتری رخ می دهد و همچنین منجر به کاهش عملکرد می شود [۱۷-۲۰]. جدول ۲ طبقه بندی شده توضیح می دهد اما پدیده های تخریب در مطالعه او مورد توجه قرار نگرفته است. حتی امروزه ، بر اساس دانش ما ، تقریبا هیچ مقاله ای در ادبیات مربوط به تخریب تعادل گیاه

(BoP) منتشر نشده است. بیشتر مطالعات بیشتر در مورد تمرکز BoP در مورد شرایط خطا و تشخیص در سطح مبدل های قدرت [۲۳] و مخازن ذخیره سازی هیدروژن [۲۴]. ۱.۳.۳.۱ خط تأمین هوا. کمپرسور هوا که بخشی از خط تامین هوا است ، برای کنترل میزان جریان هوا به عنوان ورودی کاتد پیل سوختی و فشار هوای خروجی پشته استفاده می شود. برای جلوگیری از کم آبی غشای سلول سوختی ، جریان هوا با تزریق آب مرطوب و تنظیم می شود. این رطوبت مطلوب هوا توسط مرطوب کننده تضمین می شود. دستیابی به مقدار مطلوب آب غشایی یک نکته کلیدی در جستجوی عملکرد و دوام بهتر پیل سوختی است [۱۰]. برخی از مکانیسم های تخریب در طول پروژه اروپایی GiantLeap در سطح خط تامین هوا نشان داده شده است: کمپرسور و مرطوب کننده [۲۶،۲۵] سیستم خنک کننده. سیستم خنک کننده عمدتا از یک پمپ برای گردش سیال خنک کننده ، مبدل حرارتی ، پیش گرم کننده ، فیلترهای ذرات ، فیلترهای ذرات یون ، مخزن انبساط و غیره تشکیل شده است. یک میدان جریان خنک کننده مناسب که با عملکرد مناسب طراحی شده است از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای افزایش طول عمر پیل سوختی [۲۷]. در واقع ، عدم یکنواختی دما باعث می شود که سرعت واکنش الکتروشیمیایی در نقاط مختلف متغیر باشد که می تواند منجر به تشکیل نقطه داغ شود و ثبات و دوام را کاهش دهد. اگر اهمیت یک مدیریت حرارتی خوب در ادبیات به اثبات رسیده باشد ، هیچ مکانیسم تخریب واقعا گزارش نشده است. از نظر منطقی ، یک خرابی در سیستم خنک کننده منجر به افزایش بیش از حد دما در پیل سوختی می شود که می تواند صدمات شدیدی به غشا وارد کند که می تواند برای پشته مضر باشد [۲۹،۲۸]. همچنین ، خرابی در سطح فیلترهای ذرات منجر به رسانایی بیش از حد بالای مایع خنک کننده می شود.

۲-۲-۴- تامین خط H2

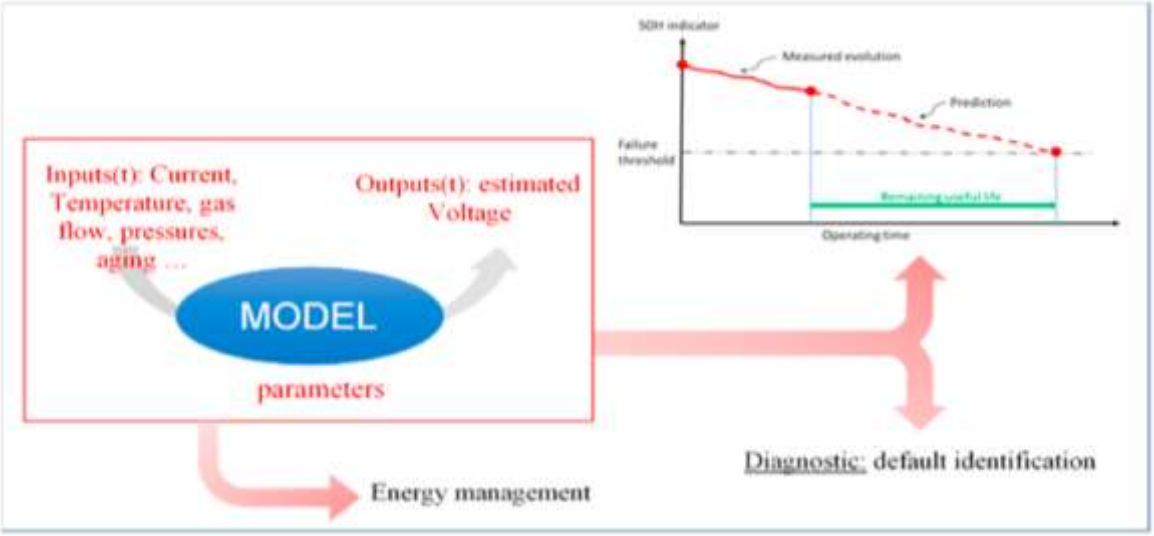
خط H2 از مخزن ذخیره گاز ، یک تنظیم کننده فشار ، یک پمپ برای گردش مجدد گاز ، یک شیر تخلیه و غیره تشکیل شده است. حالتهای خرابی در سطح مخازن هیدروژن در ادبیات علمی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مخازن ذخیره سازی ترکیبی هیدروژن نوع III ، بیشترین حالتهای شکست مورد بررسی قرار می گیرند ، ترکیدگی ، آسیب فیبر و عمر خستگی [۳۰]. در مورد نوع IV ، بیشترین حالتهای خرابی بررسی شده ، فروپاشی و تاول شدن آستر ، ترکیدگی و خرابی است [۲۴]. ظروف نوع IV یک فناوری پرکاربرد برای کاربردهای هیدروژن با فشار بالا هستند. این شامل یک آستر پلیمری داخلی است که به عنوان یک مانع نفوذ عمل می کند ، یک کامپوزیت تقویت شده با الیاف و یک پایان فلزی برای اتصالات لوله [۳۱]. فروپاشی آستر داخلی به ویژه در کاهش فشار زیاد مشاهده شده است [۳۲].

Components	Degradation mechanism	Causes	Consequence on performance
Anode (including current collectors)	Lithium plating	Low temperature; Mechanical stress; Low voltage; Low SOC;	Capacity fade; Power fade;
	Morphological changes; particle cracking; structural disordering;	Cycling; Mechanical stress; High current	Capacity fade; Power fade;
	Current collector corrosion	Low voltage; Low SOC	Capacity fade; Power fade;
Cathode (including current collectors)	Current collector corrosion	Low voltage; Low SOC	Capacity fade; Power fade;
	Binder decomposition	High temperature; High voltage; High SOC;	Capacity fade; Power fade;
	Dissolution of soluble species	High Temperature; High SOC; High Voltage;	Capacity fade;
	Morphological changes; particle cracking;	Cycling; Mechanical stress	Capacity fade; Power fade;
Electrolyte	Electrolyte decomposition	High temperature; High voltage; High SOC;	Capacity fade
Surface Electrolyte Interface layer	SEI growth	Time; high temperature; High voltage; High SOC; Cycling; High current	Capacity fade
	SEI decomposition	high temperature; High voltage; High SOC; Cycling; High current	Capacity fade
Separator	Closing of separator pores	High temperature	Capacity fade; Power fade;

جدول ۲-۲ خلاصه ای از مکانیسم های اصلی تخریب باتری و پیامدهای آن بر تخریب عملکرد.

۲-۲-۵- مبدل قدرت

در خودروهای پیل سوختی ، مبدل اصلی DC/DC بین پیل سوختی و گذرگاه DC یک کلید کلیدی است [۳۳]. اگر هیچ مکانیسم تخریب در ادبیات گزارش نشده باشد ، مبدل های قدرت در سیستم های پیل سوختی یکی از مهمترین منابع خرابی گزارش شده است. به طور دقیق تر ، منابع خرابی در سطح سوئیچ های قدرت هستند که به عنوان ظریف ترین قطعات در مبدل های DC/DC در نظر گرفته می شوند [۳۵،۳۴]. به همین دلیل است که الگوریتم های تشخیص خطای سوئیچ قدرت به منظور تضمین قابلیت اطمینان و در دسترس بودن سیستم ها ایجاد شده است [۳۶،۳۵،۲۳]. در غیر این صورت ، امواج جریان با فرکانس بالا و پایین می تواند بر عملکرد پیل سوختی تأثیر بگذارد و همچنین می تواند منجر به پدیده تخریب طولانی مدت شود و سپس طول عمر PEMFC را کاهش دهد [۳۷-۴۱]. وحدام و همکاران [۴۲] مطالعه ای را پیشنهاد می کند که بر تأثیر موج های فرکانس بالای مبدل DC بر تخریب پیل سوختی متمرکز است. برای این منظور ، دو آزمایش دوام در طول ۱۰۰۰ ساعت بر روی دو PEMFC انجام شد. در اولین آزمایش که به عنوان مرجع اشاره می شود ، پشته در ۶۰۰ وات تحت فشارهای ثابت در شرایط تقریباً نامی کار می کرد. در آزمایش دوم از پشته مشابهی استفاده شد که تحت درخواست جریان پویا عمل می کرد. نتایج نشان می دهد که تأثیر کمی از موج جریان فرکانس بالا بر عملکرد پیل سوختی تأثیر می گذارد. با توجه به [Ref 43] ، با موج زیاد جریان ، نقطه عملکرد سلول سوختی باید دور از کارآمدترین نقطه انتخاب شود تا از تلفات بیش از حد و گرم شدن بیش از حد جلوگیری شود. در این چارچوب ، توپولوژی های مبدل DC/DC جدید ، مانند مبدل های تقویت کننده داخلی ، توسعه یافته اند زیرا این توپولوژی می تواند موج های فعلی را به حداقل برساند. با این حال ، از دست دادن یک پا در صورت خرابی سوئیچ قدرت می تواند باعث افزایش شدید موج فعلی شود. گیلبرت و همکاران [۳۷،۳۶] الگوریتم ها و استراتژی های کاهش را برای غلبه بر این موضوع پیشنهاد کردند. جزئیات بیشتر در بخش ۴ ارائه خواهد شد. Thounthong و همکاران. [۴۰] یک ماژول مبدل موازی با تکنیک های ترکیبی که به یک سلول سوختی اختصاص داده شده است ارائه داد. توسط این مبدل ، امواج جریان پیل سوختی کاهش می یابد. نتایج تجربی عملکرد عالی سیستم جهانی را نشان می دهد. این که آیا یک الگوریتم پیش آگهی ، تشخیصی یا مدیریت انرژی است ، همه آنها بر اساس عملکرد سیستم است. از آنجا که عملکرد بستگی به زمان کارکرد و شرایط کار دارد ، الگوریتم های معتبر باید علل افت عملکرد را جدا کرده و از هم متمایز کنند. برای این منظور ، مدلهای تخریب مورد نیاز است. ۱.۴ هدف مدل سازی تخریب سیستم هدف از یک مدل تخریب ، بازتولید رفتار پویای سیستم در نظر گرفته شده با توجه به زمان کارکرد و شرایط عملکرد است. در نتیجه ، مدلها باید به دلیل تغییرات شرایط عملیاتی تخریب و عملکرد را در نظر بگیرند ، در غیر این صورت الگوریتم های تشخیصی و پیش آگهی قادر به تمایز بین شرایط غیرعادی کار و تخریب نخواهند بود. هدف از یک مدل تخریب در شکل ۳ برجسته شده است. هدف بازتولید رفتار پویا ، ولتاژ خروجی به صورت تابعی از تمام ورودی های تعریف شده مانند جریان ، دما ، زمان کارکرد ، فشارها ، رطوبت و غیره است. یک مدل می تواند برای اهداف تشخیصی ، پیش آگهی یا مدیریت انرژی استفاده شود. شایان ذکر است که ابزار شناسایی ، مطالعه پارامترها یا پیش بینی تحولات آنها مستقل از مدل تخریب است. در این مقاله ، بین رویکرد پیش آگهی/ تشخیص جهانی و مدلی که رفتار (عملکرد و تنزل) سیستم مورد نظر را کنترل می کند ، تفاوت ایجاد می شود.



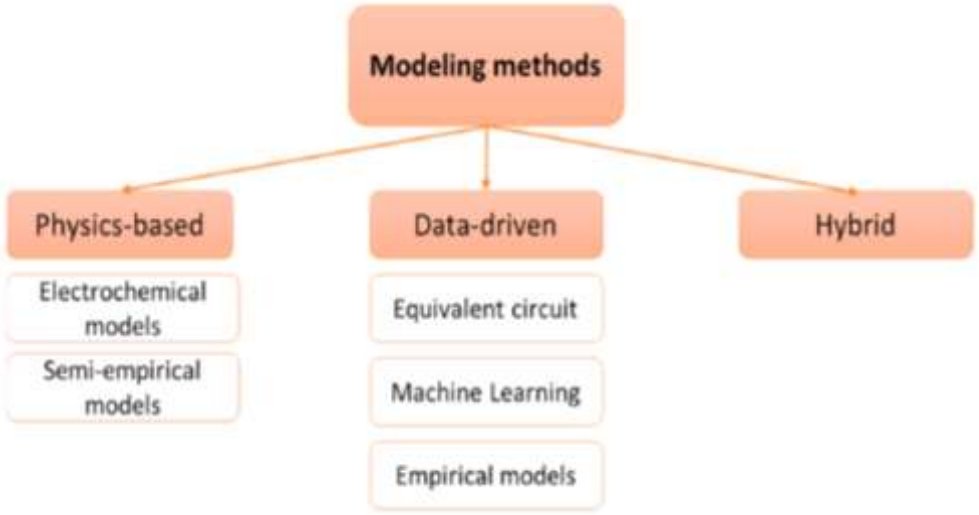
شکل ۳-۲. هدف از مدل سازی پیل سوختی.

۲-۲- طبقه بندی روشهای مدل سازی

طی دهه گذشته ، تعدادی از مطالعات بر مکانیسم های تخریب پیل سوختی و باتری و مدل سازی رفتار متمرکز شده اند. با این حال ، مطالعاتی که بر مدل سازی قوانین تخریب متمرکز شده اند بسیار کمتر است. روشهای مدل سازی سلولهای سوختی و سیستمهای باتری را می توان بر اساس سه دسته مختلف طبقه بندی کرد: مدلهای مبتنی بر فیزیک ، مدلهای داده محور و مدلهای ترکیبی (نک. شکل ۴). این سه دسته را می توان به شرح زیر تعریف کرد و توضیحات بیشتری در مورد آنها ارائه خواهد شد. در بخشهای بعدی تعاریف و مرجع ارائه خواهد شد.

• مدل های مبتنی بر فیزیک: آنها را می توان به عنوان جعبه های سفید یا خاکستری مشاهده کرد. آنها بر اساس معادلات فیزیکی سیستم در نظر گرفته شده هستند. آنها می توانند مکانیکی (مدل های سفید) ، نیمه مکانیکی یا نیمه تجربی (مدل های جعبه خاکستری) باشند. شایان ذکر است که مدلهای نیمه تجربی عمدتا بر اساس معادلات فیزیکی سیستم در نظر گرفته شده هستند ، اما می توانند یک متغیر تجربی مانند یک پارامتر مقاومتی را برای مثال ادغام کنند.

• مدل های داده محور:می توان آنها را به عنوان مدل های جعبه سیاه مشاهده کرد. آنها بر اساس داده های اندازه گیری شده برای یادگیری رفتار سیستم در نظر گرفته شده و ایجاد یک مدل هستند. مدلهای تجربی ، مدلهای مدار الکتریکی یا مدلهای شبکه عصبی به عنوان مدلهای دارای داده در نظر گرفته می شوند. • مدلهای ترکیبی: آنها هر دو مدلهای مبتنی بر فیزیک و مدلهای مبتنی بر داده را ترکیب می کنند.



شکل ۴. طبقه بندی روشهای مدل سازی PEMFC

ذخیره‌سازی هیدروژن: چگالی حجمی پایین هیدروژن، نیاز به مخازن فشار بالا یا روش‌های پیشرفته (کریوژنیک، هیدریدهای فلزی).

حساسیت به ناخالصی‌ها: برخی انواع (PEMFC, AFC) به ناخالصی‌های سوخت) مثل (CO, S بسیار حساس هستند و نیاز به تصفیه دقیق سوخت دارند.

راه‌اندازی: برخی انواع (SOFC, MCFC) زمان زیادی برای رسیدن به دمای عملیاتی نیاز دارند.

کاربردهای نویدبخش:

حمل و نقل: خودروهای سواری، اتوبوس‌ها، کامیون‌های سنگین، قطارها (به ویژه خطوط غیرالکتریکی)، کشتی‌ها و حتی هواپیماهای کوچک.

تولید پراکنده و نیروگاهی: نیروگاه‌های مقیاس کوچک و متوسط(MCFC, SOFC) ، سیستم‌های CHP برای ساختمان‌ها، بیمارستان‌ها و صنایع.

منابع تغذیه پشتیبان :(Backup Power) جایگزین پاک‌تر و کارآمدتر برای دیزل ژنراتورها در دیتاسنترها، دکل‌های مخابراتی.

الکترونیک قابل حمل: شارژرهای پیل سوختی برای لپ‌تاپ، موبایل و تجهیزات نظامی/کوهنوردی.(DMFC)

فضا و زیردریایی: تامین برق و آب آشامیدنی در فضاپیماها و زیردریایی‌ها - AFC) سابقه طولانی.(

تحقیقات و توسعه (R&D) فعلی:

کاهش هزینه کاتالیست: توسعه کاتالیست‌های غیرفلزی (Fe-N-C) یا آلیاژهای کم‌پلاتین.

الکترولیت‌های پیشرفته: غشاهای پلیمری با دوام و هدایت بالا، الکترولیت‌های اکسید جامد با دمای کار پایین‌تر (IT-SOFC).

پیل‌های سوختی دوگانه‌سوز :(Multi-Fuel) بهبود تحمل انواع سوخت (بیوگاز، آمونیاک، متانول) به ویژه در SOFC و MCFC.

افزایش طول عمر و دوام: درک مکانیزم‌های تخریب و توسعه مواد مقاوم‌تر.

هیدروژن سبز: پیشرفت الکترولایزرها برای تولید کارآمد H_2 از آب با برق تجدیدپذیر.

آینده پیل‌های سوختی:

پیل‌های سوختی نقش حیاتی در گذار انرژی و دستیابی به کربن‌زدایی در بخش‌های سخت‌کربن‌زدایی (Hard-to-Abate Sectors)مانند حمل و نقل سنگین و صنایع انرژی‌بر خواهند داشت. همکاری نزدیک با توسعه هیدروژن سبز کلید موفقیت است. انتظار می‌رود با پیشرفت‌های فناوری و افزایش تولید انبوه، هزینه‌ها به طور قابل توجهی کاهش یابد. ترکیب پیل سوختی با باتری در وسایل نقلیه هیبریدی و استفاده از سیستم‌های CHP در مناطق شهری/صنعتی، مسیرهای اصلی رشد در دهه‌های آینده هستند.

نتیجه گیری:

از طریق این کار مروری ، مشاهده شده است که بسیاری از مطالعات بر روی تجمع سلول های سوختی و تخریب باتری ها و نحوه مدل سازی تکامل عملکرد آنها متمرکز شده است. مکانیسم های تخریب که در سطح همه اجزای یک سیستم پیل سوختی کامل هیبریدی اتفاق می افتد نیز ارائه شده است. با این حال ، می توان دریافت که تخریب مواد جانبی پیل سوختی به سختی مورد بررسی قرار گرفته است و اگرچه مکانیسم های تخریب مشخص شده اند ، اما تکامل عملکرد آنها یک مسیر تحقیقاتی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در مورد مدل سازی تخریب پشته های سوختی ، روشهای زیادی در نوشتار ، مدلهای مبتنی بر فیزیک ، داده محور و برخی مدلهای ترکیبی منتشر شده است. اکثر مدل های مبتنی بر فیزیک شبه ساکن هستند و رفتار پویا را در نظر نمی گیرند. مدل های داده محور رفتار پویا را در نظر می گیرند اما برای ساختن مدل به حجم زیادی داده نیاز دارند. به نظر می رسد روشهای ترکیبی در کنار کاهش مزایا ، مزایای زیادی را ترکیب می کند. قوانین تجزیه پیل های سوختی هنوز به طور کامل تسلط ندارند ، مدل های جعبه سیاه مانند شبکه های عصبی برای یادگیری و پیش بینی از دست دادن عملکرد استفاده می شود. به لطف یک مدل ترکیبی ، رفتار در آغاز زندگی (بدون تخریب) می تواند بدون نیاز به حجم زیادی از داده ها بازتولید شود و به موازات آن ، یک ابزار یادگیری ماشین می تواند به صورت آنلاین برای یادگیری و تلفات عملکرد را در طول عمر سیستم پیش بینی کنید. در مورد باتری ، مناسب ترین روش مدل سازی بر اساس مدل مدار الکتریکی است. آنها به مقدار زیادی داده نیاز ندارند و نیاز به محاسبات نیز کم است. با تشکر از چنین مدلی می توان رفتار پویا را بازتولید کرد و ابزار قادر خواهد بود در زمان واقعی هر دو شاخص سلامت را برآورد کند: امپدانس داخلی و ظرفیت موجود با توجه به شرایط پیری و عملکرد. مدلهای یادگیری ماشین دقت خوبی را ارائه می دهند ، اما نیاز به پایگاه داده بزرگ برای انجام یک مرحله یادگیری کیفی به منظور قادر به بازتولید رفتار پویا از باتری. علاوه بر این ، از این مدل ها نمی توان برای برآورد وضعیت شاخص های سلامت استفاده کرد که می تواند برای بهینه سازی استراتژی مدیریت انرژی از اهمیت ویژه ای برخوردار باشد. در مورد تعادل گیاهان ، به نظر می رسد مدلهای مبتنی بر فیزیک بهترین راه حل در حال حاضر هستند. در واقع ، تا آنجا که می دانیم هیچ آزمون دوام طولانی مدت منتشر نشده است. این مهم است که فکر کنیم که شکست ها می توانند در همه اجزا رخ دهند ، اما قوانین تخریب و تکامل عملکرد در تحقیقات گزارش نشده است. به دلیل کمبود داده ها و دانش ، مدلهای تخریب نمی توانند توسعه داده شوند و مدلهای عملکرد مبتنی بر فیزیک بهترین راه حل تا کنون است. در آینده ، آزمایش های دوام بلند مدت می توانند تکامل عملکرد اضافه کارهای جانبی و با توجه به شرایط عملیاتی را بررسی کنند تا به بررسی پدیده های تخریب و تأثیر آنها بر عملکرد سیستم جهانی بپردازند.

پیل‌های سوختی با ارائه راه‌حلی پاک، کارآمد و انعطاف‌پذیر برای تبدیل انرژی، بیش از یک فناوری جایگزین هستند؛ آن‌ها پارادایم جدیدی در تولید انرژی محسوب می‌شوند. با وجود چالش‌های فنی و اقتصادی فعلی، پتانسیل عظیم آن‌ها در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی، سرمایه‌گذاری گسترده

جهانی در تحقیق، توسعه و تجاری‌سازی این فناوری را توجیه می‌کند. آینده انرژی بدون شک شاهد حضور پررنگ پیل‌های سوختی در کنار دیگر فناوری‌های تجدیدپذیر خواهد بود.

Abstract: Fuel cells are an advanced technology that converts the chemical energy of fuel directly into electrical energy without combustion. Unlike batteries, which store energy, fuel cells continuously produce electricity by supplying fuel and oxidant. With its high efficiency, near-zero emissions, and wide adaptability, this technology is recognized as one of the main pillars of future clean energy systems.

Keywords: Fuel cell, renewable energy, fossil fuels

منابع:

[1] L.H. Saw, Y. Ye, A.A.O. Tay, Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack, J. Clean. Prod. 113 (2016) 1032–1045.
[2] X. Lü, Y. Qu, Y. Wang, C. Qin, G. Liu, A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: issues and strategies, Energy Convers. Manag. 171 (2018) 1273–1291.
[3] A. Vadiee, M. Yaghoubi, M. Sardella, P. Farjam, Energy analysis of fuel cell system for commercial greenhouse application – a feasibility study, Energy Convers. Manag. 89 (2015) 925–932.
[4] P. Pei, H. Chen, Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: a review, Appl. Energy 125 (2014) 60–75.
[5] J. Zhao, X. Li, A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: degradation modes and experimental techniques, Energy Convers. Manag. 199 (2019) 112022.
[6] B. Wahdame, D. Candusso, X. François, F. Harel, M.-C. P´era, D. Hissel, J.- M. Kauffmann, Comparison between two PEM fuel cell durability tests performed at constant current and under solicitations linked to transport mission profile, Int. J. Hydrogen Energy 32 (2007) 4523–4536.
[7] T. Zhang, P. Wang, H. Chen, P. Pei, A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition, Appl. Energy 223 (2018) 249–262.
[8] L. Jia, Z. Tan, M. Kang, Z. Zhang, Experimental investigation on dynamic characteristics of proton exchange membrane fuel cells at subzero temperatures, Int. J. Hydrogen Energy 39 (2014) 11120–11127.
[9] Y. Hou, D. Hao, J. Shen, P. Li, T. Zhang, H. Wang, Effect of strengthened road vibration on performance degradation of PEM fuel cell stack, Int. J. Hydrogen Energy 41 (2016) 5123–5134.
[10] L. Vichard, R. Petrone, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, Long term durability test of open-cathode fuel cell system under actual operating conditions, Energy Convers. Manag. (2020) 212.
[11] J. Wu, X.Z. Yuan, J.J. Martin, H. Wang, J. Zhang, J. Shen, S. Wu, W. Merida, A review of PEM fuel cell durability: degradation mechanisms and mitigation strategies, J. Power Sources 184 (2008) 104–119.
[12] L. Vichard, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence, Int. J. Hydrogen Energy 45 (2020) 14953–14963.
[13] M. Jouin, R. Gouriveau, D. Hissel, M.-C. P´era, N. Zerhouni, Degradations analysis and aging modeling for health assessment and prognostics of PEMFC, Reliab. Eng. Syst. Saf. 148 (2016) 78–95.
[14] B. Shabani, M. Hafttananian, S. Khamani, A. Ramiar, A.A. Ranjbar, Poisoning of proton exchange membrane fuel cells by contaminants and impurities: review of mechanisms, effects, and mitigation strategies, J. Power Sources 427 (2019) 21–48.
[15] L. Vichard, F. Harel, A. Ravey, P. Venet, D. Hissel, Degradation prediction of PEM fuel cell based on artificial intelligence, Int. J. Hydrogen Energy 45 (2020) 14953–14963.
[16] L. Vichard, Contribution `a l'´etude du vieillissement des composants batterie et pile `a combustible en usage r´eel. PhD thesis, Universit´e de technologie de Belfort Montb´eliard, 2019.
[17] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, R. J. Staniewicz, Main aging mechanisms in Li ion batteries, J. Power Sources 146 (2005) 90–96.

[18] A. Barr´e, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. G´erard, F. Suard, D. Riu, A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, J. Power Sources 241 (2013) 680–689.
[19] C. Schlasza, P. Ostertag, D. Chrenko, R. Kriesten, D. Bouquain, Review on the aging mechanisms in Li-ion batteries for electric vehicles based on the FMEA method, in: 2014 IEEE Transp. Electrif. Conf. Expo Components, Syst. Power Electron. - from Technol. To Bus. Public Policy, ITEC 2014, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014.
[20] M. Dubarry, B.Y. Liaw, M.-S. Chen, S.-S. Chyan, K.-C. Han, W.-T. Sie, S.-H. Wu, Identifying battery aging mech