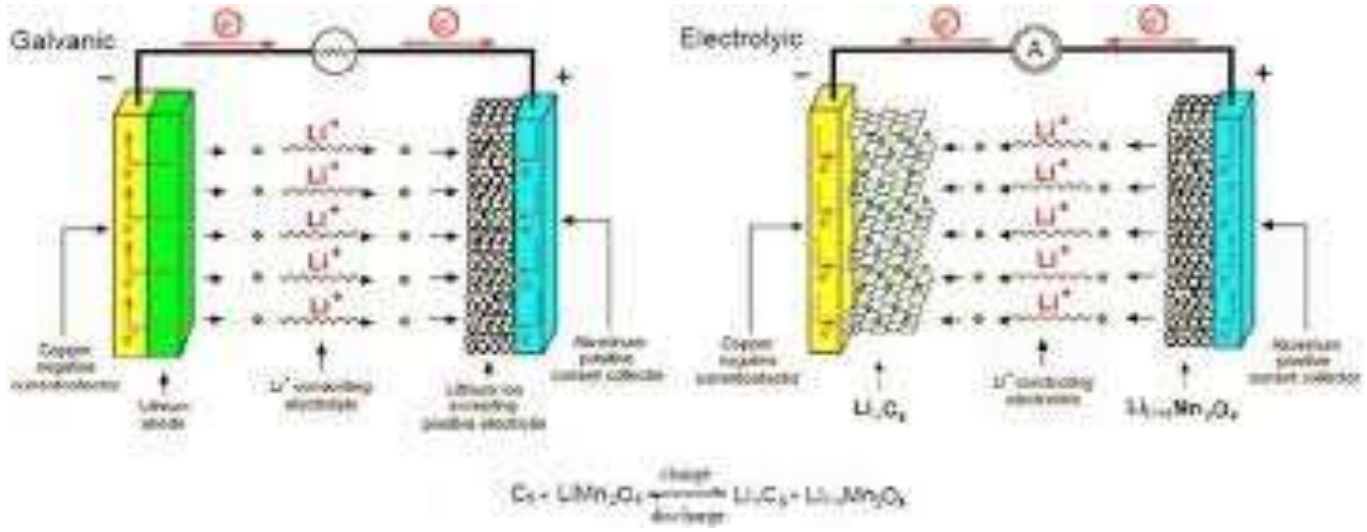


آینده‌پژوهی کاربرد ساز و کارهای الکتروشیمیایی در صنعت برق



مدیر پروژه: مجید قهرمان افشار
مجری پروژه: سید احمد احمدی

NRI-ER-759-PPCPN40-00-F


بسم الله الرحمن الرحيم

آینده‌پژوهی کاربرد سازوکارهای الکتروشیمیایی در صنعت برق

مدیر پروژه:

مجید قهرمان افشار

همکار پروژه:

حسین قاسمی‌نژاد

مجری:

سید احمد احمدی

پژوهشگاه نیرو

مردادماه ۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-759-PPCPN40-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی شیمی و فرایند

آینده‌پژوهی کاربرد سازوکارهای الکتروشیمیایی در صنعت برق/ مدیر پروژه: مجید قهرمان‌افشار.

ویراستار: نازنین محمدی‌نام. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۱۴۶ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. قاسمی‌نژاد، حسین، همکار پروژه. ۲. احمدی، سید احمد، مجری.

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی شیمی و فرایند

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه:www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **مجید قهرمان افشار** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع داده شده و در فهرست منابع و مآخذ آورده شده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران:

حسین قاسمی‌نژاد (همکار پروژه)

پیشگفتار

پژوهشگاه نیرو به‌عنوان بازوی اصلی تحقیقات و کاربرد فناوری در وزارت نیرو به‌ویژه صنعت برق کشور، مسئولیت مدیریت و اجرای تحقیقات درزمینه‌های مختلف صنعت برق را به گروه‌های پژوهشی و پژوهشکده‌های مختلف با زمینه‌های علمی متفاوت واگذار کرده است. این مجموعه دارای گروه‌هایی در حیطه‌های سیستم‌های قدرت، انرژی و محیط زیست، فشارقوی و توزیع، شیمی و فرایند، متالورژی و غیره است. گروه پژوهشی شیمی و فرایند، متشکل از تیمی پویا و باتجربه در رشته‌های شیمی و مهندسی شیمی است که این ویژگی، گروه پژوهشی شیمی و فرایند را قادر به انجام تحقیقات و ارائه خدمات در بخش‌های مختلف تولید، توزیع و انتقال برق کرده است. از اهداف اصلی گروه پژوهشی شیمی و فرایند را می‌توان، ارائه خدمات درزمینه‌های تحقیق، مشاوره، آموزش و ارائه خدمات آزمایشگاهی به صنعت برق نام برد. ازاین‌رو، در این گروه پژوهشی، همواره مباحثی پیرامون اهمیت و جایگاه علم الکتروشیمی در صنعت برق به چشم می‌خورد.

با توجه به اینکه چشم‌انداز تولید، انتقال و توزیع انرژی به‌عنوان سه بخش اصلی مربوطه در جهان همواره در حال تغییر است، کنترل کیفیت و پایش وضعیت پارامترهای مختلف در بخش سه‌گانه‌ی انرژی اهمیت فراوانی دارد. این کنترل و پایش در گذشته از طرق مختلف انجام شده و امروزه به جهت ارتقای سطح کیفیت، سرعت و دقت دستخوش تغییراتی شده است. استفاده از علوم نوین و تلفیق برخی تکنولوژی‌های جدید اعم از نانو و مواد پلیمری با علوم شیمی و الکتروشیمی، قدرت بالایی در این ارتقا از خود نشان داده‌اند.

الکتروشیمی شاخه‌ای از شیمی‌فیزیک و شیمی‌تجزیه است که به بررسی واکنش‌های شیمیایی می‌پردازد که در اثر عبور جریان الکتریکی انجام می‌شوند یا انجام یافتن آنها سبب ایجاد جریان الکتریکی می‌شود. این واکنش‌ها با تغییر عدد اکسایش عناصر همراه هستند. شیمی‌دانان با استفاده از شناسایی قوانین حاکم بر این واکنش‌ها، موفق به تولید انواع باتری‌های شیمیایی مختلف و همچنین تولید حسگرهایی با دقت و کارایی بالا شده‌اند. بنابراین، با عنایت به اهمیت و جایگاه ویژه ذخیره‌سازهای الکتریکی و افزایش روزافزون کاربرد و تولید آنها، الزام به اطمینان از تولید و عملکرد ذخیره‌سازها بسیار ضروری به نظر می‌رسد. ازاین‌رو، بررسی عملکرد الکترودها و الکترولیت‌های نوین در انواع باتری‌های جدید در رأس این پژوهش قرار گرفته است. از سوی دیگر، روند روبه‌رشد استفاده از حسگرهای مبتنی بر علم الکتروشیمی در بخش‌های صنعت برق به‌ویژه نیروگاه‌های تولید برق در اهمیت بالای این پروژه پژوهشی قرار خواهد گرفت.

تیمی تحقیقاتی از گروه پژوهشی شیمی و فرایند پژوهشگاه نیرو متشکل از افرادی با تجربه درزمینه‌ی الکتروشیمی، حسگرها و روند تولید انرژی در نیروگاه‌ها طی انجام یک پروژه در مدت زمان ۶ ماه با عنوان «آینده‌پژوهی کاربرد سازوکارهای الکتروشیمیایی در

صنعت برق» بررسی انواع و عملکرد الکترودها و الکترولیت‌های مورداستفاده در باتری و ذخیره‌سازها را به تفصیل بررسی کرده‌اند. بنابراین، در این گزارش، سازوکار ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی و باتری‌ها به همراه جزئیات بررسی خواهد شد. نتیجه این پروژه در قالب گزارشی کامل در مورد سازوکارهای ذکرشده ارائه خواهد شد و امید است در انتهای کار به‌صورت یک کتاب الکترونیکی جهت استفاده سایر متقاضیان امر ارائه شود.

ضمن تشکر از همه همکاران و متخصصان که در نگارش و جمع‌آوری این پروژه تاکنون ما را یاری کرده‌اند از جناب آقای **دکتر طاهر علیزاده** به‌عنوان ناظر محترم پروژه و همچنین معاونت پژوهشی محترم پژوهشگاه نیرو برای نظارت بر انجام همه امور از ابتدا تا انتها تشکر لازم به‌عمل می‌آید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

فهرست مطالب

فصل ۱- ذخیره‌سازهای بر پایه الکتروشیمی ۱

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- رشد و بلوغ فناوری ۳
۱-۳- باتری‌ها به‌عنوان ذخیره سازهای کلیدی صنعت برق ۴
۱-۴- جزئیات ساختاری باتری‌ها ۵
۱-۵- نحوه کارکرد باتری ۶
۱-۶- اجزای اصلی انواع مختلف باتری‌ها ۷
۱-۶-۱- آند : ۷
۱-۶-۲- کاتد : ۷
۱-۶-۳- الکترولیت : ۸
۱-۶-۴- جداکننده : ۸
۱-۷- درک مکانیسم‌ها و فهم شیمی جدید مواد آندی و کاتدی ۹
۱-۸- نوآوری در ساختار الکترود و الکترولیت ۱۰
۱-۸-۱- الکترود نوین کربن فعال ۱۰
۱-۸-۲- الکترود لیتیم-کربن نانو تیوب ۱۱
۱-۸-۳- الکترودهای باتری‌های آلومینیومی ۱۱
۱-۸-۴- جایگزینی گرافیت ساختار الکترود با سیلیکون ۱۲
۱-۸-۵- مواد بر پایه سولفور در ساختار الکترود ۱۲
۱-۸-۶- الکترودهای نوین بر پایه چیتین استخراج شده از پوست میگو ۱۳
۱-۸-۷- الکترود آند از جنس مس ۱۴
۱-۸-۸- استفاده از نانوذرات در ساختار الکترود باتری‌ها ۱۴
۱-۸-۹- استفاده از الکترودهای گرافیتی به‌منظور افزایش ظرفیت در کاربرد خودرو برقی ۱۵
۱-۸-۱۰- الکترودهای پلیمری نرم و متخلخل ۱۵
۱-۸-۱۱- پلی پیرول در ساختار الکترود باتری‌ها ۱۶
۱-۸-۱۲- آند نانوآلیاژ سه بعدی از جنس روی-منگنز ۱۷
۱-۸-۱۳- پلیمرهای صنعتی به‌عنوان الکترود باتری لیتیم- یون ۱۷
۱-۸-۱۴- فیبر کربنی در مقیاس نانو و میکرو در الکترود باتری ۱۷
۱-۸-۱۵- دی‌کادمیم استانات به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترود ۱۸
۱-۸-۱۶- ارگانو سولفور به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترود ۱۸
۱-۸-۱۷- غشاهای نانو فیبری پلی‌آنیلین به‌عنوان الکترود باتری‌ها ۱۸
۱-۸-۱۸- الکترودهای دو قطبی از جنس کربن بلک و پلیمرهای غیر هادی ۱۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۸-۱۹- فوم های کربنی مقیاس کوچک به‌عنوان الکترود باتری لیتیم- یون..... ۲۰
۱-۹- الکترولیت در باتری و ذخیره سازها..... ۲۰
۱-۹-۱- جایگزینی الکترولیت های مایع با الکترولیت جامد..... ۲۰
۱-۹-۲- معرفی الکترولیت‌های پایه آبی و معرفی مزایای آن..... ۲۱
۱-۹-۳- معرفی الکترولیت‌های آلی (حلال آلی اپروتیک) کاربردی در باتری‌های لیتیم هوا..... ۲۳
۱-۹-۴- الکترولیت هیبریدی در باتری لیتیم..... ۲۴
۱-۹-۵- استفاده از آب دریا به‌عنوان الکترولیت باتری‌های نوین..... ۲۵
۱-۹-۶- الکترولیت های پایه آبی روی..... ۲۶
۱-۹-۷- استفاده از مواد بر پایه $LiPF_6$ و پلی پروپیلن کربنات به‌عنوان الکترولیت باتری..... ۲۷
۱-۹-۸- استفاده از گرافن و سرامیک به‌عنوان الکترولیت حالت جامد باتری..... ۲۷
۱-۹-۹- الکترولیت بر پایه کربنات ها..... ۲۷
۱-۹-۱۰- الکترولیت پلی‌سیلوکسان..... ۲۸
۱-۹-۱۱- الکترولیت $LiPF_4C_2O_4$ به‌منظور بهبود کارایی باتری..... ۲۸
۱-۹-۱۲- پلیمرهای نانو کامپوزیتی به‌عنوان الکترولیت جامد..... ۲۸
۱-۹-۱۳- استفاده از الکترولیت‌های شبه جامد برای بهبود ساختار باتری‌های لیتیمی..... ۲۹
۱-۱۰- جمع‌بندی و درخت فناوری..... ۲۹
۱-۱۱- پروژه های پیشنهادی درزمینه ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی..... ۳۰
فصل ۲ روش‌های نوین تولید انرژی بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی ۳۳
۲-۱- مقدمه..... ۳۴
۲-۲- الکتروشیمی و تولید انرژی الکتریکی..... ۳۵
۲-۲-۱- سلول الکتروشیمیایی..... ۳۶
۲-۲-۲- انواع سلول‌های الکتروشیمیایی..... ۳۶
۲-۲-۳- انواع سلول‌های گالوانی..... ۳۶
۲-۳- روش‌های تولید برق بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی..... ۳۷
۲-۴- تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی..... ۳۷
۲-۴-۱- منابع تجدیدپذیر به‌منظور تولید انرژی الکتریکی..... ۳۸
۲-۴-۲- شرایط کنونی جهان، میزان پیشرفت و توجیهات فنی-اقتصادی در رابطه با منابع تجدیدپذیر..... ۳۹
۲-۵- سلول‌های سوختی (fuel cell) به‌منظور تولید انرژی الکتریکی..... ۴۰
۲-۵-۱- پیل سوختی..... ۴۰
۲-۵-۲- تاریخچه پیل سوختی..... ۴۰
۲-۵-۳- سازوکار پیل سوختی..... ۴۱
۲-۶- انواع مختلف پیل‌های سوختی..... ۴۳
۲-۶-۱- پیل سوختی قلیایی..... ۴۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۶-۲- پیل سوختی کربنات مذاب..... ۴۴
۲-۶-۳- پیل سوختی اسید فسفوریک..... ۴۵
۲-۶-۴- پیل سوختی با غشاء تبادل پروتون..... ۴۵
۲-۶-۵- پیل‌های اکسید جامد..... ۴۶
۲-۷- واکنش‌ها در پیل سوختی..... ۴۷
۲-۸- طراحی و محاسبات کلی پیل سوختی..... ۴۸
۲-۸-۱- ولتاژ..... ۴۸
۲-۹- بازده پیل سوختی..... ۴۸
۲-۹-۱- جریان..... ۴۹
۲-۱۰- مزایای استفاده از پیل‌های سوختی..... ۴۹
۲-۱۱- معایب استفاده از پیل‌های سوختی..... ۵۰
۲-۱۲- تولید هیدروژن بر پایه الکترولیز آب در دمای پایین..... ۵۱
۲-۱۳- روش تولید هیدورژن بر پایه اصلاح گاز طبیعی..... ۵۴
۲-۱۴- روش‌های میکروبی الکتروشیمیایی برای تولید هیدروژن و گاز سنتز..... ۵۵
۲-۱۵- ساختار پیل سوختی بر اساس سوخت متانول و سایر گازهای سنتزی..... ۵۶
۲-۱۶- نسل جدید پیل‌های سوختی..... ۵۷
۲-۱۷- معرفی پیل‌های سوختی دما بالا و پایین (HT و LT)..... ۵۸
۲-۱۸- پیل‌های سوختی هوشمند و قابل حمل..... ۵۹
۲-۱۹- روش AMTEC به‌منظورتولید جریان الکتریکی..... ۶۰
۲-۲۰- نکات کلیدی روش تولید جریان الکتریکی بر پایه روش‌های غشایی..... ۶۰
۲-۲۱- راکتورهای الکتروشیمیایی برای تولید و انبارش جریان الکتریکی..... ۶۱
۲-۲۱-۱- عملکرد راکتور اکسیدان، هیدروژناسیون و دی هیدروژناسیون..... ۶۲
۲-۲۲- پیل‌های سوختی میکروبی..... ۶۳
۲-۲۲-۱-MFC دو محفظه:..... ۶۴
۲-۲۲-۲-MFC تک‌محفظه:..... ۶۴
۲-۲۲-۳- سیستم انباشته:..... ۶۵
۲ ۲۲ ۳ ۱ استفاده از غشای انتقال پروتون (PEM)..... ۶۶
۲ ۲۲ ۳ ۲ واسطه ها:..... ۶۷
۲ ۲۲ ۳ ۳ عملکرد کاتد:..... ۶۷
۲ ۲۲ ۳ ۴ عملکرد آند:..... ۶۷
۲-۲۳- مدل های مختلف MFC :..... ۶۸
۲-۲۳-۱- مدل بدون واسطه :..... ۶۸
۲-۲۳-۲- مدل بدون غشاء :..... ۶۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۳-۳- مدل دارای کاتد با روکش کاتالیزور:..... ۶۸
۲-۲۳-۴-MFC های رسوبی:..... ۶۸
۲-۲۴- مزایا و معایب پیل‌های سوختی میکروبی..... ۶۹
۲-۲۴-۱- مزایا:..... ۶۹
۲-۲۴-۲- معایب:..... ۶۹
۲-۲۵- تولید انرژی بر پایه تبدیل حرارت ناشی از انبارش جریان الکتریکی..... ۷۰
۲-۲۵-۱- مزایا و معایب روش تولید جریان الکتریسته از حرارت..... ۷۱
۲-۲۶- توضیحات سیستم های بر پایه اکسید جامد..... ۷۱
۲-۲۶-۱- پیل سوختی اکسید جامد بر پایه الکترولیز..... ۷۳
۲-۲۶-۲- روش غشای انتقال اکسیژن برای تولید جریان الکتریکی..... ۷۳
۲-۲۷- روش الکترودیلیز معکوس (RED) بر ای تولید انرژی الکتریکی..... ۷۴
۲-۲۷-۱- جزئیات روش سل الکترودیالیز معکوس..... ۷۶
۲-۲۷-۲- ویژگی آب ورودی به RED:..... ۷۷
۲-۲۷-۳- شرح ساختار و عملکرد STACK های RED :..... ۷۷
۲-۲۸- مزایا و معایب روش الکترودیالیز معکوس..... ۷۸
۲-۲۸-۱- مزایای روش الکترودیالیز معکوس (RED)..... ۷۹
۲-۲۸-۲- راندمان روش الکترودیالیز معکوس..... ۸۰
۲-۲۹- جنبه های نوآوری روش الکترودیالیز معکوس..... ۸۰
۲-۳۰- جمع بندی:..... ۸۱
۲-۳۱- پروژه های پیشنهادی حوزه تولید برق بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی..... ۸۲
فصل ۳ حسگر و کاربرد آن در صنعت برق و انرژی ۸۵
۳-۱- حسگر..... ۸۶
۳-۲- نیاز به حسگر در صنعت..... ۸۶
۳-۳- حسگر های نوری در صنعت برق..... ۸۷
۳-۳-۱- ساختار حسگر..... ۸۸
۳-۳-۲- فرستنده..... ۸۸
۳-۳-۳- گیرنده ۸۸
۳-۳-۴- بخش خروجی..... ۸۹
۳-۳-۵- کاربرد حسگرهای نوری..... ۸۹
۳-۴- حسگر لومینسانس در صنعت برق..... ۹۰
۳-۵- حسگر القایی در صنعت برق..... ۹۱
۳-۵-۱- ساختمان حسگرهای القایی و اساس کار آنها:..... ۹۱
۳-۵-۲- مزایای حسگر القایی:..... ۹۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۵-۳- کاربرد حسگر القایی در کنترل صنعتی و نیروگاه :..... ۹۳
۳-۶- حسگر خازنی در صنعت برق..... ۹۳
۳-۷- حسگر مغناطیسی در صنعت برق..... ۹۵
۳-۷-۱- حسگر شدت میدان مغناطیسی چه کاربردی دارند؟..... ۹۶
۳-۷-۲- کاربردهای حسگر آهنربا چیست؟..... ۹۷
۳-۷-۳- لول سوییچ یا فلو سوییچ چیست و چه کاربردی دارد؟..... ۹۸
۳-۸- آنالیزورهای گاز در نیروگاه ها..... ۹۹
۳-۸-۱- آنالایزرهای ثابت :..... ۹۹
۳ ۸ ۱ ۱ سیستم های in situ..... ۹۹
۳ ۸ ۱ ۲ مزایا:..... ۹۹
۳-۸-۲- سیستم های extractive..... ۱۰۰
۳-۸-۳- آنالایزر های پرتابل..... ۱۰۰
۳ ۸ ۳ ۱ آنالایزرهای پرتابل کمپانی Ecom..... ۱۰۰
۳ ۸ ۳ ۲ آنالایزرهای پرتابل کمپانی Protea..... ۱۰۱
۳-۹- حسگر سنجش pH..... ۱۰۲
۳-۹-۱- کاربردهای حسگر اندازه گیری PH..... ۱۰۳
۳-۹-۲- اجزای تشکیل دهنده حسگر اندازه گیری PH..... ۱۰۴
۳-۹-۳- انواع حسگر اندازه گیری PH..... ۱۰۴
۳-۱۰- حسگر سنجش هدایت الکتریکی..... ۱۰۶
۳-۱۰-۱- کارکرد دستگاه هدایت سنج الکتریکی EC..... ۱۰۶
۳-۱۱- حسگر سنجش سدیم..... ۱۰۷
۳-۱۲- حسگر سنجش اکسیژن..... ۱۰۸
۳-۱۲-۱- سنجش میزان اکسیژن محلول در آب (تیتراسیون با معرف رنگی)..... ۱۰۸
۳-۱۲-۲- روش‌های نوین سنجش میزان اکسیژن..... ۱۰۹
۳ ۱۲ ۲ ۱ حسگر گازی نوین برخط و درمحل قابل نصب بر روی خط..... ۱۰۹
۳ ۱۲ ۲ ۲ حسگرهای پلاروگرافی تعیین میزان اکسیژن محلول..... ۱۰۹
۳ ۱۲ ۲ ۳ حسگرهای نوری تعیین میزان اکسیژن محلول..... ۱۱۰
۳-۱۲-۳- استفاده از ماده ۱۰- فنانترولین (آهن کل و محلول)..... ۱۱۲
۳-۱۲-۴- روش آهن کل (PDTS)..... ۱۱۲
۳-۱۲-۵- روش تیوسیانات فریک (آهن در شورابه ها)..... ۱۱۲
۳-۱۳- حسگر سنجش سیلیکا..... ۱۱۳
۳-۱۳-۱- اثرات سیلیکا..... ۱۱۳
۳-۱۳-۲- پایش سیلیکا..... ۱۱۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۳-۳- پایش سیلیکا برای حذف مواد Demineralization ۱۱۴
۳-۱۳-۴- دستگاه سنجش سیلیکا شرکتWALTRON ۱۱۴
۳-۱۴- پایش پیوسته کیفیت سوخت نیروگاه ها ۱۱۴
۳-۱۴-۱- روش مرجع سنجش اجزای موجود در گاز طبیعی ۱۱۵
۳-۱۴-۲- آنالایزر گاز طبیعی Micro GC ۱۱۶
۳-۱۴-۳- آنالیزور GC Portable ۱۱۷
۳ ۱۴ ۳ ۱ مزایا: ۱۱۷
۳-۱۵- مفاهیم ماشین لرنینگ در پردازش داده حسگرها ۱۱۸
۳-۱۶- کاربرد فیبرهای نوری در ساخت حسگرهای سنجش ولتاژ بالا ۱۱۹
۳-۱۷- کاربرد حسگرهای فیبر نوری در سنجش میدان های الکتریکی قوی ۱۱۹
۳-۱۸- حسگرهای نوین سنجش جریان اتوماتیک ذخیره سازها ۱۲۰
۳-۱۹- حسگرهای لیزری نوین در فرایند کنترل شیمیایی نیروگاه ها ۱۲۰
۳-۱۹-۱- مزایای حسگرهای لیزری دمایی ۱۲۱
۳-۲۰- جمع بندی: ۱۲۱
۳-۲۱- پروژه های پیشنهادی در حوزه حسگرها ۱۲۲
فصل ۴ مراجع ۱۲۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ (الف) ساختار یک باتری (سلول Daniell) (ب) ساختار یک خازن الکتروشیمی (ج) ساختار یک سلول سوخت [۱]..۳۰
شکل ۱-۲ اجزاء تشکیل دهنده باتری.....۷
شکل ۱-۳ اجزاء مختلف انواع باتری ۸
شکل ۱-۴ مسیر حرکت یونها و الکترون ها در باتری.....۹
شکل ۱-۵ الکترولیت های جامد مورداستفاده در باتری‌ها.....۲۱
شکل ۱-۶ الکترولیت های آپروتیک.....۲۴
شکل ۱-۷ الکترولیت های هیبریدی.....۲۵
شکل ۱-۸ الکترولیت باتری با آب دریا.....۲۶
شکل ۱-۹ الکترولیت پایه آبی– روی.....۲۶
شکل ۱-۱۰ درخت فناوری انواع ذخیره سازهای انرژی.....۳۰
شکل ۲-۱ شماتیک پیل سوختی.....۴۲
شکل ۲-۲ پیل سوختی قلیایی ۴۴
شکل ۲-۳ پیل سوختی کربنات مذاب.....۴۵
شکل ۲-۴ پیل سوختی اسید فسفریک و PEM.....۴۶
شکل ۲-۵ پیل سوختی اکسید جامد.....۴۷
شکل ۲-۶ شمای الکترولیز آب جه تولید هیدروژن.....۵۱
شکل ۲-۷ فرایند های شیمیایی حین اتفاق افتادن الکترولیز.....۵۲
شکل ۲-۸ عملکرد راکتور اکسیدان، هیدروژناسیون و دی هیدروژناسیون.....۶۲
شکل ۲-۹ پیل سوختی میکروبی دو محفظه ای.....۶۴
شکل ۲-۱۰ تولید انرژی بر پایه تبدیل حرارت ناشی از انبارش جریان الکتریکی.....۷۱
شکل ۲-۱۱ شماتیک سیستم های بر پایه اکسید جامد.....۷۲
شکل ۲-۱۲ شماتیک استک در الکترودیالیز معکوس.....۷۵
شکل ۲-۱۳ ساختار و عملکرد STACK های RED.....۷۸
شکل ۲-۱۴ درخت فناوری بخش الکتروشیمی و تولید انرژی.....۸۲
شکل ۳-۱ شماتیک عملکرد حسگر.....۸۶
شکل ۳-۲ نمونه ای از حسگر نوری مورداستفاده در کارخانجات تولیدی ۸۷
شکل ۳-۳ شماتیک حسگر نوری.....۸۸
شکل ۳-۴ اجزای حسگر القایی.....۹۱
شکل ۳-۵ نحوه کارکرد حسگرهای القایی.....۹۲
شکل ۳-۶ شماتیک و اجزای حسگر خازنی.....۹۴

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

شکل ۳-۷ تعیین ضخامت مواد عایق توسط حسگر خازنی..... ۹۵
شکل ۳-۸ اجزای حسگر مغناطیسی..... ۹۶
شکل ۳-۹ نوع کاربرد لول سوئیچ و فلو سوئیچ..... ۹۸
شکل ۳-۱۰ نمونه ای از آنالایزر پرتابل..... ۱۰۲
شکل ۳-۱۱ نمونه ای از دستگاه pH متر و نوع کارکرد..... ۱۰۳
شکل ۳-۱۲ حسگر آندازه گیری pH..... ۱۰۵
شکل ۳-۱۳ حسگر اندازه گیری هدایت الکتریکی..... ۱۰۷
شکل ۳-۱۴حسگر سنجش گاز اکسیژن..... ۱۰۹
شکل ۳-۱۵ حسگر پلاروگرافی..... ۱۱۰
شکل ۳-۱۶ درخت فناوری مربوز به حسگرهای کاربردی در صنعت برق..... ۱۲۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ پارامترهای الکتروشیمیایی موردنظر برای باتری قابل شارژ روی–پلی آنیلین..... ۱۹
جدول ۲-۱ انواع پیل‌سوختی و خصوصیات آنها..... ۵۳
جدول ۲-۲ انواع مختلف MFC های تک‌محفظه‌ای با توجه به نوع آند و کاتد..... ۶۴
جدول ۲-۳ اخـتلاف غلظـت نمـک در دو منبع آب غلیظ و رقیق..... ۷۴

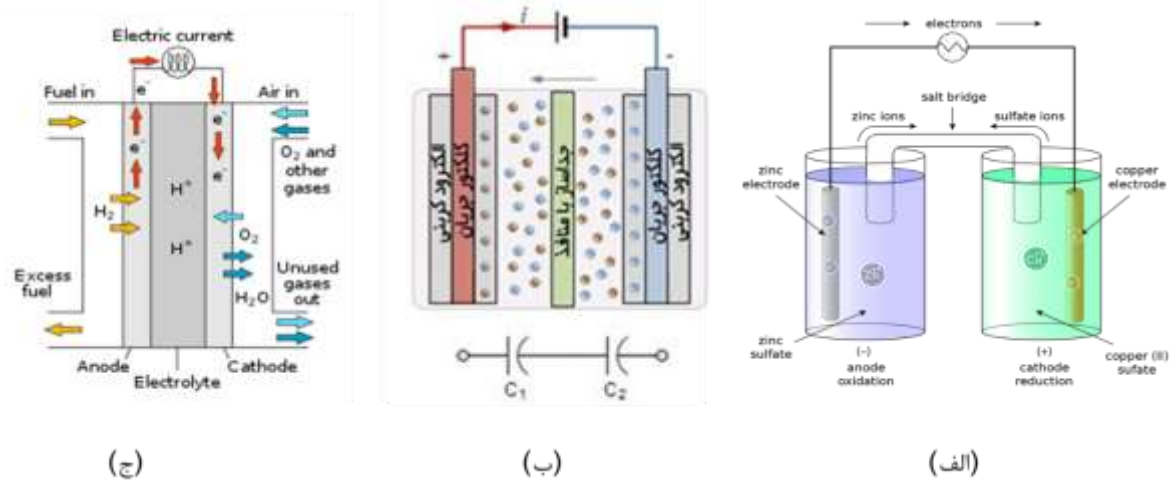
فصل ۱ ذخیره‌سازهای بر پایه الکتروشیمی

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش آلودگی محیط و کمبود انرژی، ذخیره‌سازی انرژی در حوزه انرژی‌های پایدار و تجدیدپذیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ذخیره‌سازی انرژی به فرایند ذخیره انرژی اضافه در یک شکل و استفاده از آن در همان شکل یا شکل دیگر در زمان موردنیاز گفته می‌شود. با توجه به اهمیت ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه انرژی پاک حاصل از منابعی مانند سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی و همچنین نظر به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و توسعه خودروهای هیبریدی، مطالعات گسترده‌ای در دهه‌های اخیر بر روی ساخت و بهبود منابع ذخیره‌سازی انرژی صورت گرفته است. باتری‌ها و به‌ویژه باتری‌های لیتیم یون از منابع ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هستند که ظرفیت بالای ذخیره‌سازی دارند. بااین‌حال، این سیستم‌ها توان جریان‌دهی مطلوبی ندارند که این به علت سینتیک کند واکنش‌های اکسایش/کاهش در آنها است. ازاین‌رو، برای کارکرد وسایلی که به توان الکتریکی بالا نیاز دارند، مانند خودروهای الکتریکی و هیبریدی، ترکیب کردن باتری‌ها با سیستم‌های ذخیره‌ساز دیگری که دارای نرخ جریان‌دهی بالا و ظرفیت مناسبی باشند، از ضروریات اساسی است. سیستم‌های ذخیره و تبدیل انرژی الکتروشیمیایی عبارت‌اند از: باتری‌ها، سلول‌های سوختی و خازن‌های الکتروشیمیایی. اگرچه مکانیزم ذخیره و تبدیل انرژی در این سیستم‌ها متفاوت از یکدیگر است اما از نقطه نظر الکتروشیمیایی شباهت‌هایی میان آنها وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، در تمامی این سیستم‌ها فرایندهای تأمین انرژی در فاز مرزی فصل مشترک الکترود/الکترولیت رخ داده و انتقال الکترون‌ها و یون‌ها، جدای از یکدیگر است. مکانیزم پایه‌ای عملکرد هر یک از این سیستم‌ها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، هر سه سیستم مشتمل بر دو الکترود مرتبط با یک محلول الکترولیت هستند [۱, ۲].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱-۱ (الف) ساختار یک باتری (سلول Daniell) (ب) ساختار یک خازن الکتروشیمی (ج) ساختار یک سلول سوخت [۱].

در شکل ۱-۱ (الف) نمایش تصویری ساختار یک باتری (سلولDaniell) که نشان‌دهنده‌ی خصوصیات کلیدی عملکرد باتری و الزامات انتقال الکترون‌ها و یون‌ها است (ب) نمایش تصویری ساختار یک ابرخازن که نشان‌دهنده‌ی ذخیره‌ی انرژی در دولایه‌ی الکتریکی در سطح مشترک الکترود/الکترولیت است (ج) نمایش تصویری ساختار یک سلول سوختی که نشان‌دهنده‌ی تدارک پیوسته‌ی واکنشگرها (هیدروژن و اکسیژن) برای انجام واکنش اکسایش/کاهش در سلول است.

۱-۲- رشد و بلوغ فناوری

ازآنجاکه مطالعات به‌منظور بررسی افق آینده کشور ایران است، بنابراین بررسی جایگاه هر باتری و ذخیره‌ساز، انواع حسگرها و نوآوری در هر بخش به لحاظ پیشرفت و نبوغ فناوری ارزش زیادی دارد. یکی از معیارهایی که برای سنجش آمادگی و بلوغ فناوری‌ها مورداستفاده قرارگرفته، سطوح آمادگی فناوری یا (TRL) [۱] است. TRL ابزاری تحلیلی برای سنجش و ارزیابی سطح آمادگی و بلوغ فناوری و مقدار خطرپذیری ناشی از استفاده از یک فناوری در توسعه محصول است. هدف از این کار، کاهش ریسک پروژه‌های فناوری و تعدیل هزینه‌های ناشی از آزمون فناوری‌ها و پروژه‌های ارتقای فناوری است. ازاین‌رو، بررسی این مشخصه برای باتری‌های مختلف نشان‌دهنده سطح پیشرفت و کارایی آن درحال‌حاضر و افق آینده خواهد بود. بنابراین، در جدول جمع‌بندی انتهایی فصل این مشخصه با ۹ مرتبه مختلف برای هر بخش ارائه شده است. این مراتب مختلف به شرح زیر است.

1 Technology Readiness Level

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱. ایده اولیه
۲. مرحله فرمولاسیون شدن ایده
۳. آزمون ایده
۴. صحت‌سنجی مؤلفه‌های مختلف در آزمایشگاه
۵. صحت‌سنجی مؤلفه‌ها در محیط‌های مربوطه و موردنظر
۶. اعتبارسنجی تمام سیستم در محیط مناسب و موردنظر
۷. اعتبارسنجی سیستم در محیط واقعی
۸. اعتبارسنجی نهایی و ارائه گواهی
۹. تأیید نهایی آزمون برای سیستم

در موارد یادشده، مراحل شماره ۱ تا ۴ مربوطه به بررسی‌های آزمایشگاهی، موارد ۵ و ۶ مربوط به مرحله بررسی در شبیه‌سازی محیطی و مورد ۷ الی ۹ نیز مربوط به انجام مطالعه در محیط واقعی است. ازاین‌رو در این گزارش هر بخش از نظر بلوغ تکنولوژی بررسی شده و مرحله کنونی آن ارائه شده است.

۱-۳- باتری‌ها به‌عنوان ذخیره‌سازهای کلیدی صنعت برق

فاکتورهای مختلفی مانند نوع عملکرد، زمان پاسخگویی و مدت‌زمان ذخیره‌سازی برای دسته‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد. یکی از رایج‌ترین دسته‌بندی‌های ذخیره‌سازها بر اساس شکل انرژی ذخیره‌شده در سیستم است. بر این اساس ذخیره‌سازها به ذخیره‌سازهای مکانیکی (تلمبه برق‌آبی، هوای فشرده و چرخ طیار)، ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی (باتری‌های قابل‌شارژ و باتری‌های جریانی)، ذخیره‌سازهای الکتریکی (خازن، ابرخازن و ابرخازن مغناطیسی)، ذخیره‌سازهای شیمیایی (ذخیره‌ساز هیدروژی با سل خورشیدی) و ذخیره‌ساز حرارتی (حرارتی محسوس، نهان و ترموشیمیایی) تقسیم‌بندی می‌شود.

درحال‌حاضر چالش‌های قابل‌ملاحظه‌ای در راه گسترش ذخیره‌سازی وجود دارد. در اکثر موارد به دلایل مختلف، هزینه‌ی ذخیره‌سازی بیش از مزایای اصلی آن است و محدودیت مجوزهای قانونی برای استفاده از ذخیره‌سازی وجود دارد. در مقابل انگیزه‌های قابل‌توجه برای فرصت‌های ذخیره‌سازی وجود دارد: توسعه‌ی فناوری ذخیره‌سازی ماژولار برای بازار روبه‌رشد خودروهای برقی و دستگاه‌های الکترونیکی قابل‌حمل، افزایش تمایل به مدیریت پیک تقاضای بار و اتکا به برنامه‌های مدیریت تقاضای بار با توجه به محدودیت‌های پیک تولید و انتقال، انتظار افزایش نفوذ منابع انرژی پراکنده و شبکه هوشمند، افزایش استفاده از انرژی‌های

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

تجدیدپذیر با خروجی متناوب، خطرات مالی که سرمایه‌گذاری در ظرفیت شبکه انتقال جدید را محدود می‌کند. همراه با افزایش نیاز به الکتریسیته و تراکم بالای خطوط انتقال و همچنین الزام به افزایش ظرفیت در شبکه انتقال در بسیاری از مناطق، تأکید بر افزایش قیمت انرژی و خدمات برق مانند قیمت‌گذاری انرژی بر اساس زمان مصرف، تسریع در کاهش قیمت و بهبود عملکرد ذخیره‌سازی انرژی و افزایش آگاهی قانون‌گذاران، سیاست‌گذاران و مدیران نقش مهمی در آینده ذخیره‌سازهای انرژی در صنعت برق ایفا می‌کنند. در مجموع ذخیره‌سازها در جهت بهبود عملکرد شبکه مزایای فراوانی دارند که با افزایش نفوذ انرژی‌های نو این کاربردها گسترده‌تر و مؤثرتر می‌شود [۳, ۴].

از سوی دیگر، عدم شناخت صحیح استفاده از انواع ذخیره‌سازها، هزینه زیاد به‌کارگیری از ذخیره‌سازها در صنعت برق و مشکلاتی در بخش سیاست‌گذاری‌ها همواره معایب اصلی به‌کارگیری از ذخیره‌سازها در صنعت برق بوده است [۵].

۱-۴- جزئیات ساختاری باتری‌ها

باتری‌ها انرژی الکتریکی را از طریق واکنش‌های شیمیایی ذخیره می‌کنند. به عبارت دیگر شارژ کردن یک باتری سبب واکنش‌های الکتروشیمیایی اجزای آن می‌شود و به این ترتیب انرژی را به شکل شیمیایی ذخیره می‌کنند. بر اساس نیاز، واکنش معکوس شیمیایی موجب شارش جریان الکتریکی از باتری به سمت شبکه می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم باتری‌ها زمان پاسخ سریع آنها است؛ برخی از باتری‌ها قادرند در کمتر از ۲۰ میلی‌ثانیه به تغییرات بار پاسخ دهند. بازده باتری‌ها بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ است که بستگی به نوع باتری و نیز سیکل استفاده از آن دارد. تلفات ذخیره انرژی باتری‌ها کم است و در عین حال چگالی ذخیره انرژی الکتریکی بالایی دارند. شاید بتوان ایراد اصلی باتری‌ها را طول عمر آنها دانست. معمولاً طول عمر باتری‌ها نسبت به سایر سیستم‌های ذخیره انرژی کوتاه‌تر است و باید به‌صورت دوره‌ای آنها را جایگزین کرد. باتری‌ها به دلیل تبادلات انرژی از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی، بسیار به شرایط محیطی همچون دما و حرارت حساس هستند و این عوامل موجب کم شدن عمر مفید آنها خواهد شد. با این وجود گسترش روزافزون تولیدات پراکنده و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی الکتریکی موجب استفاده بیش از پیش از باتری‌ها در سیستم‌های قدرت شده است. ساختار سلولی باتری‌ها موجب می‌شود که بتوان از طریق اتصال تعداد مختلف سلول‌های باتری، به ظرفیت، توان و ولتاژ دلخواه سیستم ذخیره باتری دست یافت [۵, ۶].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

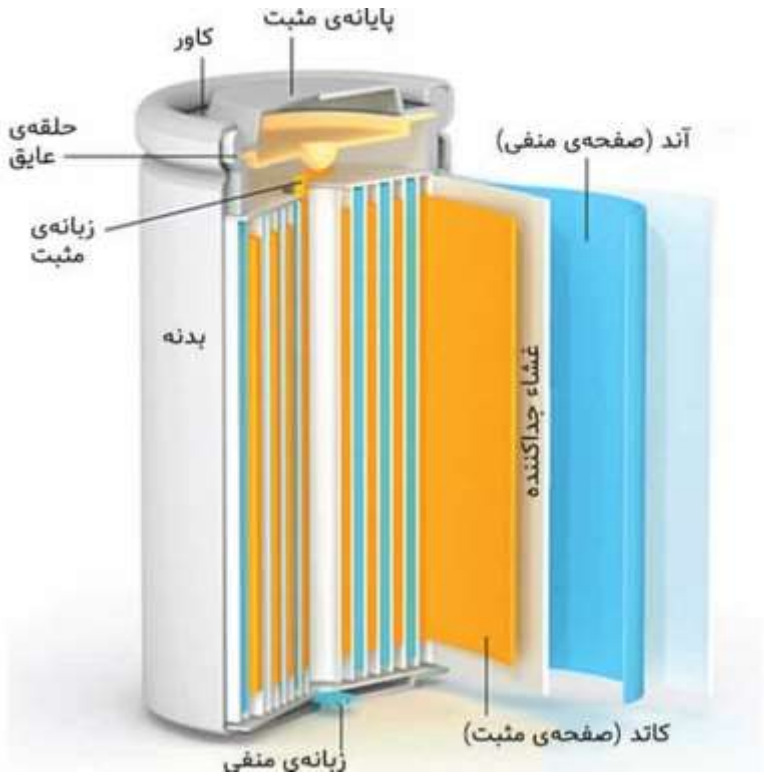
باتری یا پیل الکتریکی در واقع منبعی از انرژی پتانسیل است و ساختار آن از چند سلول تشکیل شده که هر سلول وظیفه تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد. باتری‌ها از ۳ بخش اصلی یک آند یا همان قسمت منفی (–)، یک کاتد یا همان قسمت مثبت (+) و نوعی الکترولیت (یک ماده شیمیایی که با آند و کاتد واکنش می‌دهد) تشکیل شده‌اند که در ادامه به‌صورت کامل توضیح داده خواهد شد [۷].

۱-۵- نحوه کارکرد باتری

زمانی که آند و کاتد یک باتری به مدار متصل است، یک واکنش شیمیایی بین آند و الکترولیت اتفاق می‌افتد. این واکنش باعث حرکت الکترون‌ها در درون مدار و برگشت آنها به کاتد شده و در آنجا (کاتد)، یک واکنش دیگر رخ می‌دهد. زمانی که مواد موجود در کاتد یا آند مصرف شده یا دیگر در واکنش قابل‌استفاده نباشد، باتری دیگر قادر به تولید الکتریسیته نخواهد بود. در این حالت، باتری اصطلاحاً « مرده » است.

هر باتری متشکل از یک یا چند سلول کوچک‌تر است که برای افزایش جریان با هم موازی یا برای افزایش ولتاژ با هم سری شده‌اند. هر سلول خود شامل دو نیم‌سلول است. ماده‌ی دی‌الکتریک که دارای یون‌های مثبت و منفی است به‌صورت سری با هم بسته شده‌اند و تشکیل یک سلول واحد را می‌دهند. با وصل شدن باتری به مصرف‌کننده یون‌های مثبت به سمت یون‌های منفی حرکت کرده و تولید جریان می‌کنند. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که تمام یون‌ها با یکدیگر خنثی شوند که در این صورت مقاومت داخلی باتری به تدریج افزایش یافته و بعد از مدتی باتری کاملاً تخلیه می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۱-۲ اجزای تشکیل دهنده باتری [۷]

۱-۶- اجزای اصلی انواع مختلف باتری‌ها

۱-۶-۱- آند

به الکترود منفی (قطب منفی) آند می‌گویند که الکترون از آن خارج می‌شود. به‌صورت قراردادی جریان الکتریکی مخالف جهت حرکت الکترون‌ها است، پس جریان الکتریکی به آند (قطب منفی) وارد می‌شود.

۱-۶-۲- کاتد

به الکترود مثبت (قطب مثبت) کاتد می‌گویند که الکترود به آن وارد می‌شود. همان‌طور که گفته شد به‌صورت قراردادی جریان الکتریکی مخالف برای حرکت الکترون‌ها است، درنتیجه جریان الکتریکی از کاتد (قطب مثبت) خارج می‌شود.

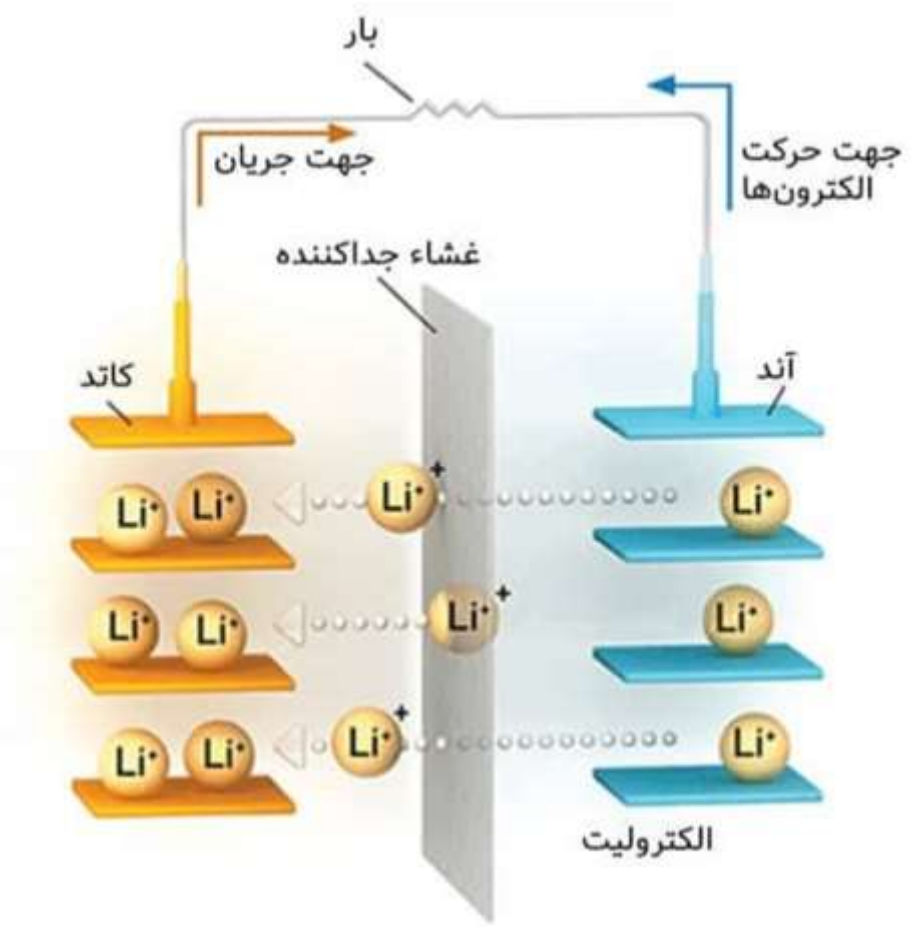
DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۶-۳- الکترولیت

الکترولیت به ماده‌ای که بین دو قطب است < می‌گویند که معمولاً به‌صورت مایع یا ژل است. یون‌ها به راحتی بین دو قطب و از طریق الکترولیت جابه‌جا می‌شوند اما از انتقال الکترون‌ها درون باتری جلوگیری می‌کنند.

۱-۶-۴- جداکننده

جداکننده‌ها مواد متخلخلی هستند که از اتصال آند و کاتد (اتصال کوتاه در درون باتری) به یکدیگر جلوگیری می‌کنند. ماده‌ی سازنده جداکننده‌ها متفاوت است. پنبه، نایلون، پلی‌استر، مقوا و لایه‌های پلیمر مصنوعی از موادی هستند که در ساخت جداکننده‌ها استفاده می‌شوند. جداکننده‌ها با هیچ یک از اجزای آند، کاتد و یا الکترولیت واکنش نمی‌دهند.

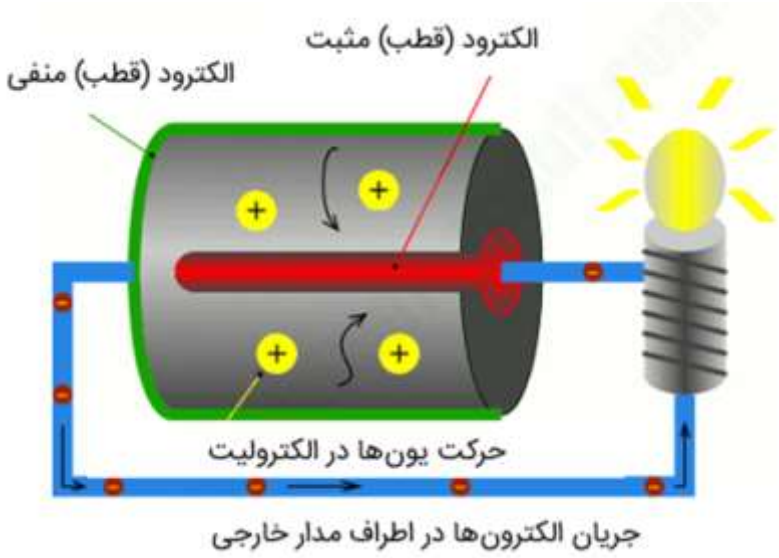


شکل ۱-۳ اجزای مختلف انواع باتری [۷]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۷- درک مکانیسم‌ها و فهم شیمی جدید مواد آندی و کاتدی

الکترودهای مثبت و منفی توسط الکترولیت‌های شیمیایی از هم جدا می‌شوند. این الکترولیت‌ها می‌توانند مایع باشند، اما به احتمال فراوان در یک باتری معمولی به شکل پودر خشک هستند. وقتی باتری را به یک لامپ متصل کرده و آن را روشن می‌کنید، واکنش‌های شیمیایی شروع می‌شوند. یکی از واکنش‌ها موجب می‌شود یون‌های مثبت (که در اینجا به شکل حباب‌های بزرگ زردرنگ نمایش داده شده‌اند) و الکترون‌ها (حباب‌های کوچک‌تری که به رنگ قهوه‌ای نمایش داده شده‌اند) در الکترود منفی تولید شوند. درحالی‌که الکترون‌ها در اطراف محور خارجی (خط آبی) به الکترود مثبت جریان پیدا می‌کنند و موجب روشن شدن لامپ می‌شوند، یون‌های مثبت به داخل الکترولیت جریان پیدا می‌کنند. اما در الکترود مثبت، یعنی جایی که الکترون‌های وارده مجدداً با یون‌های خارج‌شده از الکترولیت به هم می‌رسند، یک واکنش شیمیایی متمایز اتفاق می‌افتد و به این صورت مدار جریان تکمیل می‌شود [۵, ۸].



شکل ۱-۴ مسیر حرکت یون‌ها و الکترون‌ها در باتری [۸].

الکترون‌ها و یون‌ها به دلیل وقوع واکنش‌های شیمیایی درون باتری جریان پیدا می‌کنند (که معمولاً دو عدد از آنها در یک زمان واحد جاری می‌شوند). واکنش‌های دقیق به مواد سازنده الکترودها و الکترولیت وابسته است. هر مقدار که واکنش‌های شیمیایی اتفاق افتند، اصل کلی گردش الکترون‌ها در اطراف محور خارجی و واکنش یون‌ها به الکترولیت (ورود یا خروج از آن) در مورد تمام باتری‌ها صدق می‌کند. همان‌طور که باتری نیرو را تولید می‌کند، مواد شیمیایی درون آن به تدریج به مواد شیمیایی متفاوتی تبدیل می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

به این ترتیب ظرفیت تولید نیروی آنها کاهش می‌یابد، ولتاژ باتری به تدریج پایین می‌آید و سرانجام باتری از کار می‌افتد. به عبارت دیگر، اگر باتری به دلیل خالی شدن مواد شیمیایی داخل آن قادر به تولید یون‌های مثبت نباشد، نخواهد توانست الکترون‌های محور خارجی را نیز تولید کند.

۱-۸- نوآوری در ساختار الکترود و الکترولیت

اجزای سازنده باتری‌های معمولی شامل آند، کاتد و الکترولیت است. توجه به این نکته که الکترودهای باتری همیشه از دو ماده غیر مشابه ساخته می‌شوند، بسیار اهمیت دارد. بدیهی است که این مواد باید رسانای خوب الکتریسیته باشند. در الکترود مورداستفاده در باتری‌ها یکی از این مواد مایل به ترک الکترون‌ها و دیگری مایل به دریافت آنهاست. اگر هر دو الکترود از یک ماده یکسان ساخته می‌شدند، این امر محقق نمی‌شد و هیچ جریانی پدید نمی‌آمد. بنابراین، به‌منظور تسهیل در انتقال بار و استحکام مکانیکی و افزایش طول عمر باتری بهتر است نوآوری در به‌کارگیری از الکترودهای نوین در باتری در دستور کار تولیدکنندگان قرار گیرد. به‌طورکلی طول عمر هر باتری، برحسب تعداد سیکل شارژ و تخلیه و میزان سطح تخلیه باتری بیان می‌شود و انرژی که این سیستم‌ها ذخیره می‌کنند محصول توان و زمان تخلیه است. یکی دیگر از اجزای مهم باتری که باید در انتخاب و نوع مواد آن دقت شود، الکترولیت باتری است. الکترولیت محلولی است که بین دو الکترود ارتباط برقرار می‌کند. ازاین‌رو، نوآوری و انتخاب بهینه الکترولیت در روند افزایش طول عمر و بهبود عملکرد باتری اثر بسزایی دارد [۹].

۱-۸-۱- الکترود نوین کربن فعال

باتری‌ها و ابرخازن‌ها در ابعاد و اشکال مختلفی تولید و عرضه می‌شوند و هیچ نوع از آنها به‌صورت‌کلی برای همه کاربردهای موردنظر، مناسب استفاده نیستند، از سوی دیگر انرژی قابل‌ارائه توسط باتری‌ها رابطه‌ای مستقیم با اندازه باتری و مواد به‌کار گرفته‌شده در آن دارد، حتی باتری‌هایی از یک نوع و دارای ابعاد همسان و مواد متشکل یکسان که از سوی کارخانه‌های مختلف تولید شده‌اند نیز تا حدودی متفاوت از هم هستند. بر این اساس استفاده از الکترودهایی بر پایه کربن فعال به‌منظور افزایش عملکرد و رسانایی بالاتر در باتری‌ها و ابرخازن‌ها اهمیت بالایی دارد. امروزه متخصصان این حوزه با استفاده از

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

پودر کربن، چسب مخصوص، افزودنی‌هایی مانند CNT، گرافن، مواد ابررسانا و غیره قادر به ساخت اکترودهای نوین کربنی شده‌اند که مزایای زیادی مانند افزایش طول عمر باتری، افزایش بازه دمایی، بهبود عملکرد و کاهش وزن باتری شده است [۱۰, ۱۱].

۱-۸-۲- الکترود لیتیم-کربن نانوتیوب

نانولوله‌های کربنی از سال ۱۹۹۰ به‌وسیله‌ی گروه‌های تحقیقاتی بسیاری به‌عنوان ماده فعال الکترود آند باتری یون لیتیوم پیشنهاد شده است. مقدار ظرفیت الکترود آند ساخته‌شده با نانولوله‌های کربنی از ظرفیت الکترود آند ساخته‌شده با گرافیت و سایر مواد بیشتر است. این‌گونه از الکترودها با افزودن لیتیم به کربن نانوتیوب به‌منظور کوتاه کردن مسیر حرکت الکترون‌ها باعث افزایش چرخه شارژ/دشارژ باتری می‌شود. به‌طورکلی، استفاده از نانولوله کربنی برای الکترود آند این باتری‌ها منجر به افزایش مساحت سطح ویژه الکترودها، افزایش سرعت واکنش‌ها بر روی سطح الکترودها شده و باعث ظرفیت بالا در این باتری‌ها می‌شود [۱۲, ۱۳].

۱-۸-۳- الکترودهای باتری‌های آلومینیومی

باتری آلومینیومی اولین باتری فلزی است. این نوع فلز معمولاً در بدنه هواپیما و خودرو به‌کار می‌رود. این باتری دارای قابلیت شارژ سریع و عمر طولانی است. مواد الکترود این باتری جدید تنها از آلومینیوم و گرافیت دوستدار محیط زیست ساخته شده و الکترولیت آن از نمک لیتیوم و حلال کربنات تشکیل شده است. ضعف باتری‌های آلومینیومی قبلی عمر کوتاه باتری بود که تقریباً پس از ۱۰۰ بار شارژ و دشارژ شدن خراب می‌شد. باتری‌های آلومیینیومی جدید را می‌توان حدود ۷۵۰۰ بار شارژ کرد. این در حالی است که باتری‌های لیتیومی که اکنون در گوشی‌های هوشمند، کامپیوترهای شخصی و ماشین‌های برقی استفاده می‌شود تنها قابلیت ۱۰۰۰ بار شارژ کردن را دارند.

باتری آلومینیومی جدید تنها نصف باتری لیتیومی ولتاژ تولید می‌کند. بنابراین این باتری‌ها فاصله زیادی با عرضه عمومی دارند. این باتری انعطاف‌پذیر است. می‌توان آن را خم یا حتی تا کرد؛ بنابراین به دلیل وجود دو مزیت زمان نگهداری شارژ بالا و وزن بسیار سبک می‌توان از این باتری در کاربردهای هواپیمایی، گوشی‌های انعطاف‌پذیر یا بند ساعت‌های هوشمند استفاده کرد [۱۴].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۸-۴- جایگزینی گرافیت ساختار الکترود با سیلیکون

سیلیکون در قالب ماده آندی جذابیت بالایی پیدا کرده است. علت آن ظرفیت تئوری ۳۵۷۰ mAh/g این ماده است؛ چیزی ده برابر بیشتر از گرافیت و لیتیم- تیتانیوم- اکسید. عنصر سیلیکون از طریق مکانیزم ترکیب یا جداسازی آلیاژی با لیتیوم واکنش می‌دهد و آلیاژ سیلیکون-لیتیوم را می‌سازد، اما تغییر حجم بیش از ۳۰۰ برابر طی شارژ و دشارژ باتری باعث انبساط و انقباض مکرر ساختار آند و ترک برداشتن ذرات و جداشدن مواد فعال می‌شود که نتیجه آن افت سریع ظرفیت برگشت‌پذیر است.

به‌طورکلی، نانوذرات سیلیکون به دلیل داشتن تحمل بالا در برابر تنش‌های مکانیکی، عملکرد بهتری نسبت به لایه‌های نازک و میکروذرات در باتری‌های یون-لیتیوم دارند. ازاین‌رو موارد متعددی از کاربرد ساختارهای سیلیکونی در محل آند در باتری‌های یون لیتیوم مشاهده می‌شود که شامل نانوسیم‌ها و نانولوله‌های سیلسکونس یک بعدی است. با اتصال الکترونیکی مناسب بین نانوساختار سیلیکون و کلکتور جریان و الکترولیت، ظرفیت قابل‌برگشت این باتری‌ها می‌تواند به ۲۰۰۰ mAh/g با تکرارپذیری مناسب برسد. ساختارهای پیچیده‌تری مثل کامپوزیت‌های SiC [1] هم گزارش شده که در آنها نانوذرات Si با توزیع یکنواختی روی ساختار درختی کربن سیاه نشسته است. در چنین ساختارهایی Si و گرافیت هر دو اجزای فعال هستند. عملکرد کربن به‌طور خاص چندگانه است؛ کربن ماتریس رسانا برای انتقال مؤثرتر بارها، جبران‌کننده تغییرات حجمی سیلیکون و در عین حال میزبان فعال یون لیتیوم برای رسیدن به ظرفیت برگشت‌پذیر است. این ساختار می‌تواند ظرفیت قابل‌برگشتی معادل ۱۹۵۰ mAh/g داشته باشند [۱۵, ۱۶].

۱-۸-۵- مواد بر پایه سولفور در ساختار الکترود

باتری‌های لیتیوم- گوگرد انرژی ذخیره‌شده در پیوند لیتیم- سولفور را به‌کار می‌گیرند و می‌توانند به ظرفیت ویژه‌ای در حدود ۸۰۰mAhg/S در مقابل ظرفیت تئوری ۱۶۷۲mAhg/S برسند.

باتری لیتیم- سولفور از یک آند لیتیومی، الکترولیت آلی و کاتدی از کامپوزیت گوگرد تشکیل شده است. واکنش دشارژ شامل کاهش گوگرد با الکترون‌ها و کاتیون‌های لیتیوم برای تولید سولفید لیتیوم است. از مشکلات اصلی باتری لیتیم- سولفور می‌توان به برگشت‌پذیری پایین آن به خاطر مقاومت الکترونیکی بالای محصولات گوگرد و سولفید لیتیوم، انحلال پلی‌سولفیدها طی فرایند و تغییرات مورفولوژی اشاره کرد که تمایل دارند کاتد را کم‌اثر کنند. روش‌های مختلفی بر پایه نانومواد کامپوزیتی بررسی شده تا این

1 Silicon- carbon

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

مشکلات را رفع کند. با اینکه هم‌اکنون باتری‌های لیتیم- سولفور با ۱۵۰۰ سیکل موفق به اثبات رسیده‌اند، اما این باتری‌ها هنوز در جایگاه عرضه برای استفاده در خودروهای الکتریکی نیستند [۱۷].

کاتدهای متداول برای باتری‌های لیتیم- سولفور از کامپوزیت‌های گوگرد-کربن یا گوگرد-پلیمر ساخته می‌شود که حضور کربن یا پلیمر رسانایی الکترونیکی را افزایش می‌دهد و می‌توان از مواد فعال استفاده کرد. رویکردهایی بر اساس ساختار مزوحفره استفاده شده تا سولفیدهای لیتیوم را تثبیت و مشکل حل شدن پلی‌سولفید را رفع و هدایت الکترونیکی را بالا ببرد. ساختارهایی با ابعاد حفره کوچک‌تر از ۲ نانومتر با ترکیبی از گوگرد تصعیدشده و کُره‌های کربن میکرومتخلخل سنتز شده است. این ساختارهای میکرومتخلخل از کامپوزیت گوگرد-کربن با جذب قوی، واکنش‌های الکتروشیمیایی را درون کربن میکرومتخلخل باریک محدود کرده و ازاین‌رو به بیش از ۵۰۰ سیکل با ظرفیت حدود ۸۰۰mAhg-1S رسیده است. ساختارهای کربن مزوپور با ۲ تا ۵۰ نانومتر می‌توانند حجم گوگرد بالاتری را به همراه اتصال بهتر الکتریکی و ظرفیت بالاتر ایجاد کنند. کامپوزیت‌های تو در تو، شامل کربن میکروحفره و مزوحفره، می‌توانند از مزایای خواص هر دو ساختار در یک قالب واحد استفاده کنند. این مزایا شامل محدود کردن واکنش‌های الکتروشیمیایی و فراهم کردن ارتباطات ضروری الکتریکی برای جدا نگهداشتن گوگرد و سولفیدها است [۱۸].

ساختار دیگر قابل‌اتکا شامل نانوکامپوزیت‌های گوگرد – اکسید گرافن است. اکسید گرافن گزینه جذابی است؛ چون به‌شدت رسانا است و امکان تلفیق ترکیبش را در گروه‌های عاملی مختلف ممکن می‌کند. دوره عمر بالای ۱۵۰۰ سیکل با این سیستم‌ها با اتلاف ظرفیت کم به‌دست آمده است.

۱-۸-۶- الکترودهای نوین بر پایه چیتین استخراج‌شده از پوست میگو

امروزه تولید الکترودهای جدید با استفاده از ماده‌ای در پوسته سخت میگو موسوم به چیتین صورت گرفته است. این ماده دارای نوعی سلولز موسوم به پلی‌ساکارید است که برای تولید مواد مختلفی از بسته‌بندی مواد غذایی گرفته تا پوشش‌های زرهی و نیز داروهای ارزان‌تر به‌کار گرفته می‌شود [۱۹].

اما کاربرد جدید این ماده، تولید الکترود برای استفاده در باتری‌هاست. محققان دانشگاه ام آی تی می‌گویند با استفاده ازاین‌روش هم ظرفیت شارژ باتری‌ها افزایش می‌یابد و هم سرعت شارژ آنها بهتر می‌شود. از سوی دیگر کاربرد این روش از استهلاک باتری‌ها نیز می‌کاهد. سازگاری با محیط زیست مزیت دیگر الکترودهایی است که با چیتین میگو تولید شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

با استفاده ازاین‌روش می‌توان نوع جدیدی از باتری‌ها، موسوم به باتری‌های مایع را تولید کرد که الکترودهای آنها قابلیت ذخیره‌سازی انرژی را دارند و در محیط‌های بسیار متنوعی قابل‌استفاده هستند [۲۰, ۲۱].

۱-۸-۷- الکترود آند از جنس مس

در باتری‌های لیتیوم یونی، معمولاً آند از جنس اکسیدهای فلزی و یا گرافیت است و الکترودها توسط جداکننده از هم جدا می‌شوند. در هر سمت الکترود یک جمع‌کننده جریان تعبیه شده است که در برخی موارد این جزء در سمت الکترود منفی از جنس مس و در سمت الکترود مثبت از جنس آلومینیوم است. آلومینیوم به‌کاررفته در سمت کاتد، با ایجاد یک لایه محافظ از خوردگی آن جلوگیری می‌کند. جداکننده به‌کاررفته در باتری، به‌منظور انتقال یون لیتیوم باید متخلخل باشد تا حرکت یون‌های لیتیوم از آند به کاتد و برعکس به آسانی انجام گیرد. استفاده از الکترود آند مس به جای گرافیت در این نوع باتری‌ها باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و بهبود رسانایی در باتری خواهد شد [۲۲].

۱-۸-۸- استفاده از نانوذرات در ساختار الکترود باتری‌ها

به‌طورکلی دو نوع باتری قابل‌شارژ که از نانوفناوری در ساختار آن استفاده شده است و بیشتر تحقیقات نیز بر روی این دو گروه انجام می‌شود، اول باتری‌های بر پایه لیتیم است. برای مثال باتری‌های یون –لیتیم، دوم باتری‌های بر پایه هیدریدهای فلزی است. محققان ثابت کرده‌اند که استفاده از مواد نابلوری و نانولوله‌ها در این دو نوع باتری باعث افزایش چشمگیری در طول عمر، دانسیته جریان و سرعت شارژ شدن آنها شده است. نانولوله‌ها به‌عنوان جایگزینی مناسب برای گرافیت معمولی در ساختار الکترود گرافیت – لیتیم در نظر گرفته شده‌اند. به دلیل کوچک بودن ساختار نانولوله سطح مفید تماس آنها با لیتیم بیشتر از گرافیت معمولی است به‌طوری‌که ظرفیت یک لایه نانولوله در آزمایشگاه به ۶۴۰ آمپرساعت به کیلوگرم رسیده است. با استفاده از فناوری نانو در ساخت باتری‌ها در ابتدا میزان شارژ مجدد آنها ۱۰ برابر شد که اکنون با توسعه این فناوری باتری‌های کنونی تا ۱۰۰ برابر باتری‌های قبلی بدون استفاده از فناوری نانو قابلیت شارژ مجدد را دارند [۲۳, ۲۴].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۸-۹- استفاده از الکترودهای گرافیتی به‌منظور افزایش ظرفیت در کاربرد خودرو برقی

کوچک‌ترین واحد سازنده‌ی باتری خودروی الکتریکی، سلول الکتروشیمیایی است؛ سلولی متشکل از دو الکترود مثبت و منفی و غوطه‌ور در الکترولیت که فرایند شارژ و تخلیه در آن، با الحاق و آزادسازی یون لیتیوم بین دو الکترود انجام می‌گیرد.

گرافیت که کمتر موردتوجه واقع شده، هنوز یکی از عناصر اصلی سازنده باتری‌های لیتیوم- یون است. در حقیقت اگر گفته شود که باتری‌های لیتیوم- یون بیشتر از لیتیوم به گرافیت نیاز دارند، بزرگ‌نمایی خاصی صورت نگرفته است؛ چرا که میزان مصرف گرافیت در این باتری‌ها چیزی بیش از ۱۰ تا ۲۰ برابر لیتیوم مصرف شده در آنها است [۲۵].

مزیت استفاده از گرافیت، چرخه عمر بالا و همچنین فراوانی آن است. گرافیت در سطوح اتمی، به‌صورت ساختارهای لانه‌زنبوری منظم هدایت الکتریکی قابل‌توجهی را از خود نشان می‌دهد که به‌منظور افزایش ظرفیت در باتری برای تولید باتری‌های قابل‌شارژ بسیار لازم و ضروری است [۲۶].

۱-۸-۱۰- الکترودهای پلیمری نرم و متخلخل

استفاده از ماده پیونده پلیمری، می‌تواند نقش پیونددهی مواد کاتدی را روی جمع‌کننده جریان به خوبی ایفا کند. به‌طورکلی، پلیمر پیونده مناسب برای کاربرد در الکترود باتری‌های یون لیتیم باید افزون‌بر فراهم کردن خواص چسبندگی بسیار مناسب، از شرایط اساسی زیر نیز برخوردار باشد:

- از نظر الکتروشیمیایی پایدار و خنثی باشد، یعنی پلیمر نباید در واکنش‌های الکتروشیمیایی کاتد شرکت کند
- زیست‌سازگار باشد.
- قیمت و هزینه‌های کاربرد آنها در ساختار باتری به‌صرفه باشد.

افزون بر نکات عمومی یادشده، لازم است تا پلیمر پیونده تمایل به ترشوندگی مطلوب با الکترولیت را داشته باشد. بدین‌معنی که افزون بر انحلال‌ناپذیری در الکترولیت مایع، از سازگاری لازم با نوع الکترولیت مصرفی (آبی یا آلی) نیز برخوردار باشد، به‌طوری‌که سطح کاتد به راحتی در الکترولیت مایع خیس بخورد. برخی انواع الکترودهای پلیمری متخلخل، با پر کردن منافذ خالی به‌وسیله‌ی ذرات سرامیکی، باعث افزایش ظرفیت و استحکام باتری می‌شوند [۲۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

برخلاف سلول‌های لیتیوم- یون استوانه‌ای و منشوری که در یک قاب صلب فلزی قرار دارند، سلول‌های لیتیوم – پلیمر دارای قاب انعطاف‌پذیر فویل (ورقه پلیمری) است و در نتیجه این سلول‌ها انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. این سلول‌ها تقریباً ۲۰٪ سبک‌تر از سلول‌های استوانه‌ای معادلشان با ظرفیت یکسان هستند. سلول‌های لیتیوم- پلیمر مزیت‌های جالب‌توجهی برای تولیدکنندگان دارند. با استفاده از این سلول‌ها می‌توان باتری‌ها را در تقریباً هر شکل دلخواهی تولید کرد. برای مثال، به دلیل فضای کم و محدودیت وزن برای تلفن‌های همراه و لپ‌تاپ‌ها در این محصولات از سلول‌های لیتیوم- پلیمر استفاده می‌شود. همچنین، این سلول‌ها نرخ تخلیه درونی پایینی، در حدود ۵٪ در هرماه، دارند [۲۸, ۲۹].

۱-۸-۱۱- پلی‌پیرول در ساختار الکترود باتری‌ها

پلیمرهای رسانای مختلفی ازجمله: پلی‌استیلن (PA)، پلی‌آنیلین (PANI)، پلی‌پیرول (PPy)، پلیتیوفن (PTh) و پلی(پی-فنیلن وینیلن) (PPV)، ساخته شده‌اند و به دلیل ویژگی‌های مشترک رساناهای آلی و مواد پلیمری در طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی، مانند تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی، الکترونیک انعطاف‌پذیر، و دستگاه‌های زیست‌پزشکی، مورداستفاده قرار می‌گیرند.

استفاده از ژل‌های پلیمری رسانا به‌عنوان مواد اتصال‌دهنده یکی دیگر از ابزارهای امیدوارکننده برای افزایش عملکرد باتری‌های لیتیم یون است. چارچوب بسیار رسانا و پیوسته‌ی ژل‌های پلیمری رسانا منجر به ایجاد یک اتصال الکتریکی خوب بین ذرات و یک اتصال مستقیم خوب به جمع‌کننده جریان می‌شود، که منجر افزایش نرخ می‌شود. منافذ سلسله‌مراتبی درون این الکترودها، سطح تماس بین مواد فعال و الکترولیت را به حداکثر می‌رساند و انتقال یون را تسهیل می‌کند. به دلیل ماهیت آب‌دوستی هیدروژل، پلیمر می‌تواند به شدت به سطوح ذرات فعال متصل شود و یک پوشش یکنواخت ایجاد کند، بنابراین از تجمع ذرات فعال جلوگیری می‌شود. این پوشش باعث می‌شود هر ذره فعال در باتری به جمع‌کننده جریان و الکترولیت جامد یا مایع وصل شود [۳۰, ۳۱].

الکترودهای نانوساختار سه‌بعدی سه‌گانه از جنس PPy-Si-CNT ساخته شده که ظرفیت برگشت‌پذیری معادل mAhg/S 1600 و ظرفیت ذخیره‌سازی بیش از ۸۵ درصد پس از ۱۰۰۰ سیکل را دارند. استفاده از نانولوله‌های کربنی، توانایی انتقال الکترون را بهبود می‌دهد و هر دو اتصالات فیزیکی و الکترومغناطیسی بین نانوذرات سیلیسیم و چارچوب ژل‌پلیمری رسانا را به‌شدت بالا می‌برد. [۳۲].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۸-۱۲- آند نانوآلیاژ سه‌بعدی از جنس روی-منگنز

باتری‌های آبی پایه روی (Zinc-Based Aqueous Batteries) با استفاده از الکترولیت آبی (به جای حلال‌های شیمیایی سابق) از تهدید بروز آتش‌سوزی در باتری جلوگیری می‌کنند. اما رشد کنترل‌نشده‌ی دندریت‌ها پتانسیل آنها را برای داشتن عمری طولانی و عملکرد بالای موردنیاز برای کاربردهای عملی، محدود می‌کند. درحال‌حاضر، یک آند نانو آلیاژ سهبعدی از جنس روی-منگنز این معایب را برطرف کرده است. همچنین منجر به یک باتری آبی ثابت، با کارایی بالا و بدون دندریت شده است که از آب دریا به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. این باتری در عین کم‌هزینه بودن، چگالی انرژی بالا و پایداری را فراهم می‌کند. این باتری‌ها قابل شارژ بوده و با افزایش تعداد چرخه شارژ-دشارژ و ایمنی بالاتر از هر نظری مطمئن هستند [۳۳].

۱-۸-۱۳- پلیمرهای صنعتی به‌عنوان الکترود باتری لیتیم- یون

با به‌کارگیری لایه‌های پلیمری بر سطح آند لیتیوم و استفاده از الکترولیت سرامیکی در باتری‌های لیتیم یون، نوعی باتری لیتیومی حالت جامد ساخته شده است که هیچ‌گونه تخریب ساختاری در آن رخ نداده و پس از طی چندصد چرخه شارژ و دشارژ هم ظرفیتی را از دست نمی‌دهد. این لایه‌های پلیمری از الکترولیت سرامیکی باتری محافظت کرده و مانع از ایجاد ترسیب‌های مخرب بر سطح فلز می‌شوند. این باتری تحت آزمون‌های مختلفی قرار گرفته و تاکنون چند صد چرخه شارژ و دشارژ را طی کرده و با هیچ‌گونه فقدان ظرفیتی مواجه نشده است. این لایه پلیمری همانند یک لایه محافظ عمل کرده و مانع از اتصال مستقیم الکترولیت سرامیکی با آند لیتیوم می‌شود. از طرفی، از وقوع فرایندهای مخرب تشکیل شاخه‌های دندریتی و تغییرات شیمیایی در الکترولیت سرامیکی نیز جلوگیری به‌عمل خواهد آمد. تست‌های اولیه از این باتری نویدبخش بودند و پس از طی ۵۰۰ چرخه شارژ و دشارژ میزان بسیار ناچیزی افت ظرفیت مشاهده شده است [۳۴, ۳۵].

۱-۸-۱۴- فیبر کربنی در مقیاس نانو و میکرو در الکترود باتری

نانوالیاف کربن نوعی فیبر کربن در مقیاس نانو است. این ماده را می‌توان در نانو الیاف کربن توخالی و جامد طبقه‌بندی کرد، با توجه به ویژگی‌های ساختاری آن. قطر آن به‌طورکلی در محدوده ۱۰ تا ۵۰۰ نانومتر و طول آن در محدوده ۰٫۵ تا ۲۰۰ میکرومتر است. این ماده، که دارای درجه بالاتری از جهت‌گیری بلوری است، برای هدایت الکتریکی و حرارتی ترجیح داده می‌شود. این ماده دارای تراکم کم، مدول مغناطیسی بالا، مقاومت بالا، رسانایی بالا و ثبات حرارتی مناسب بوده و همچنین این ماده با روش رشد

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

رسوب بخار شیمیایی ساخته شده است. نانوکامپوزیت‌های کربن در کاربردهای مختلفی مانند تبدیل و ذخیره انرژی، یونیزاسیون خازنی، مواد الکترود، کاتالیز، جذب / جداسازی، ترمیم نشت روغن و در زمینه پزشکی استفاده می‌شود. ساختار منحصربه‌فرد این نانوالیاف کربنی متخلخل منجر به عملکرد خوب الکتروشیمیایی مانند ظرفیت برگشت‌پذیر بالا و ثبات چرخه خوب در هنگام استفاده به‌عنوان آند برای باتری‌های لیتیوم یون قابل‌شارژ می‌شود [۳۶, ۳۷].

۱-۸-۱۵- دی‌کادمیم استانات[1] به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترود

مواد اکسیدی رسانا به‌منظور کاربرد در فناوری نوین به‌عنوان الکترولیت‌های جامد برای انواع ذخیره‌سازها و باتری‌های نوین، سلول‌های سوختی و الکترود شفاف موردتوجه قرار گرفته‌اند. دی‌کادمیوم استانات ($Cd_2\ SnO_4$) به‌عنوان یک ماده سنتزشده و رسانا مناسب برای افزایش ولتاژ در الکترود باتری‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر رسانایی خوب این مواد، افزایش دامنه دمایی باتری‌های تولیدشده با این ماده از مزیت‌های آن برشمرده می‌شود [۳۸].

۱-۸-۱۶- ارگانو سولفور[2] به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترود

ترکیبات آلی گوگرد یا ترکیبات اورگانوسولفور دسته‌ای از ترکیبات آلی هستند که در آن اتم کربن با اتم‌های گوگرد پیوند شیمیایی دارند. این دسته از مواد به دلیل وجود کربن در کنار گوگرد توانایی افزایش ظرفیت شارژ در باتری‌ها را دارند. لازم به یادآوری است که با به‌کارگیری از فناوری نانو در سنتز مواد اورگانوسولفور امید است که عملکرد الکترودهای ساخته‌شده با این مواد بهبودیافته و میزان ظرفیت شارژ در باتری را نیز افزایش دهد [۳۹].

۱-۸-۱۷- غشاهای نانوفیبری پلی‌آنیلین به‌عنوان الکترود باتری‌ها

پلی‌آنیلین با ساختار نانوفیبر به روش نرمال پالس ولتامتری سنتز و به‌عنوان کاتد در باتری قابل‌شارژ روی-پلی‌آنیلین مورداستفاده قرار گرفته است. به دلیل افزایش سطح مؤثر پلیمر سنتزشده با ساختار نانوفیبر در مقایسه با باتری‌هایی که در آنها از پلیمری با ساختار معمولی استفاده شده است، کارایی این باتری‌ها افزایش پیدا می‌کند به‌طوری‌که این باتری‌ها ظرفیت دشـــارژ ۲۳۵ $Ahkg^{-1}$ و

1 dicadmium stannate
2 organo sulfur

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

انرژی ویژه 1-Ahkg ۲۸۷ را از خود نشـــان می‌دهند و در محدوده وســـیعی از چگالی ۶/۵ 0.3 – 2-mAcm کارایی به بازه ۹۷–۱۰۰ درصد می‌رسد. پارامترهـــای الکتروشـــیمیایی موردنظـــر برای باتری قابل‌شـــارژ روی–پلـــی‌آنیلین در جدول ۱-۱ ارائه شده است [۴۰].

جدول ۱-۱ پارامترهای الکتروشیمیایی موردنظر برای باتری قابل‌شارژ روی–پلی‌آنیلین [۴۰]

پارامترها	روش سنتز پلیمر	
	NPV	CV
ولتاژ مدار باز (V)	۱٫۵۵	۱٫۴
تعداد چرخه‌های قابل‌شارژ	۱۲۰	۲۵۰
ظرفیت دشارژ (Ah/Kg)	۲۳۵٫۶	۱۱۲٫۱
محدوده چگالی جریان (mA/cm^2)	۰٫۳-۵٫۶	۰٫۳-۰٫۹

۱-۸-۱۸- الکترودهای دوقطبی[1] از جنس کربن بلک و پلیمرهای غیر هادی

در طی دهه گذشته توجه زیادی به استفاده از الکترودهای دوقطبی در انواع باتری‌های قابل‌شارژ از جمله باتری‌های سرب– اسید، باتری‌های قلیایی و غیره شده است. از دلایل اهمیت باتری‌های دوقطبی قابل‌شارژ می‌توان به چگالی انرژی بالا، وزن کم، توان الکتریکی زیاد، ظرفیت و کارآیی بالاتر نسبت به باتری‌های تک‌قطبی قابل‌شارژ اشاره کرد. در برخی از باتری‌ها از بستر پلی‌اتیلن دوپه‌شده به‌عنوان پلیمر غیر هادی با کربن بلک استفاده می‌شود. در این نوع باتری‌ها تغییر بستر از سرب به پلی‌اتیلن باعث کاهش وزن و در ادامه کاهش هزینه‌های ساخت باتری می‌شود [۴۱, ۴۲].

الکترود باتری‌ها بر پایه الاژیک اسید[2]

1 bipolar electrodes
2 ellagic acid

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

باتری‌های لیتیومی در خط مقدم فناوری باتری قرار دارند و تحقیقات برای یافتن مواد جدید برای بهبود عملکرد در الکترود این نوع باتری‌ها در حال انجام است. پلیمرهای آلی رسانا به‌عنوان الکترود مناسب در این باتری‌ها در اوایل دهه ۱۹۲۰ پیشنهاد شده است.

اسید الاجیک یک پلی‌فنول چهارحلقه متصل است. اسید الاجیک در بسیاری از میوههای قرمز و انواع توت‌ها، از جمله تمشک، توت‌فرنگی، تمشک، سیب‌زمینی، انار و بعضی از آجیل‌ها از قبیل گردو استفاده می‌شود. اسید الاژیک، یک پلی‌فنول طبیعی و استخراج‌شده از میوه‌ها، الکترودی ارگانیک و بسیار خوب برای باتری‌های لیتیومی قابل‌شارژ با ظرفیت برگشت‌پذیری بالا است [۴۳, ۴۴].

۱-۸-۱۹- فوم‌های کربنی مقیاس کوچک[1] به‌عنوان الکترود باتری لیتیم- یون

بهبود ساخت الکترود در باتری‌های لیتیم- یون به‌منظور تسهیل در انتقال بار و استحکام مکانیکی آن اهمیت فراوانی دارد. استفاده از فوم (ابر) نقره با تخلخل نانومتری و رسوب نانولوله‌های کربنی به درون آنها با روش الکتروفورز باعث افزایش سطح ویژه الکترود و اتصال با دوام نانولوله‌ها به شبکه نقره‌ای در چرخه‌های متعدد عملکرد باتری می‌شود. ازاین‌رو، نسبت سطح به حجم (سطح ویژه) بسیار بالا، نفوذپذیری یا تراوایی زیاد، گزینش‌پذیری خوب و مقاومت گرمایی از ویژگی‌های مهم استفاده از این مواد در ساخت الکترود باتری‌ها است [۴۴].

۱-۹- الکترولیت در باتری و ذخیره‌سازها

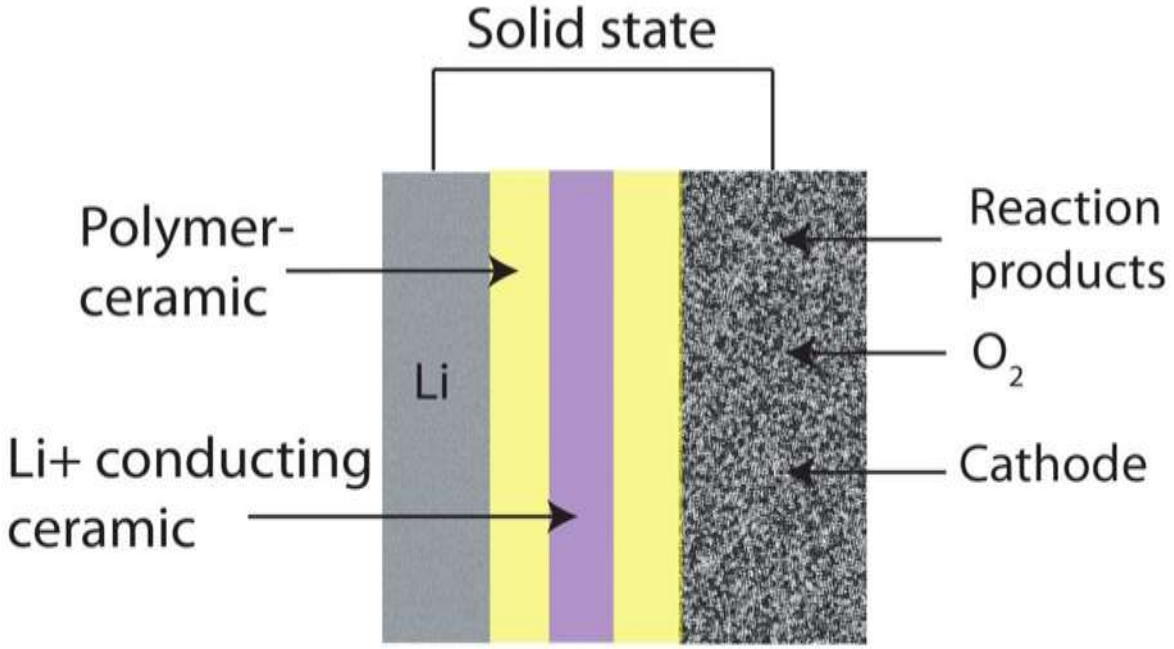
۱-۹-۱- جایگزینی الکترولیت‌های مایع با الکترولیت جامد

الکترولیت‌های مایع که در اکثر باتری‌های امروزی یافت می‌شوند، با وجود عملکرد بسیار خوب ضعف‌های متعددی دارند. رشته‌های کوچک فلز لیتیوم می‌توانند در جریان‌های بالا درون الکترولیت شکل گرفته و سبب اتصال کوتاه باتری شوند. باتری حالت جامد همان‌طور که از نامش پیدا است، الکترولیت مایع سنگین موجود در باتری‌های لیتیوم یون را حذف می‌کند. جایگزین آن الکترولیت جامدی است که می‌تواند به شکل شیشه، سرامیک یا مواد دیگر باشد. ساختار کلی باتری حالت جامد کاملاً مشابه ساختار

1 carbonaceous multi scale cellular foam

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

باتری‌های لیتیوم یون است، با این تفاوت که نیازی به الکترولیت مایع ندارند و چنین باتری‌هایی می‌توانند بسیار متراکم و جمع‌وجور باشند. باتری‌های حالت جامد بدون غوطه‌وری عمیق در کارهای داخلی خود، انرژی‌شان را صرف می‌کنند و دقیقاً شبیه باتری‌های لیتیوم یون سنتی، دوباره شارژ می‌شوند. علاوه بر این الکترولیت‌های مایع بسیار آتش‌زا بوده و بروز اتصال کوتاه می‌تواند سبب آتش‌سوزی شود. امروزه اشتیاق فراوانی برای جایگزینی الکترولیت‌های مایع باتری‌های کنونی با مواد جامد وجود دارد، چون امنیت بیشتری داشته و چگالی انرژی بیشتری را فراهم می‌کنند. یکی از بزرگ‌ترین مزایای الکترولیت‌های شیشه‌ای حالت جامد این است که آتش‌زا نبوده و از شکل‌گیری رشته‌های لیتیوم جلوگیری کرده و با افزایش تعداد چرخه شارژ–تخلیه و کاهش هزینه تولید به باتری توانایی فعالیت در جریان‌های بالا را می‌دهند [۴۵, ۴۶].



شکل ۱-۵ الکترولیت‌های جامد مورداستفاده در باتری‌ها [۴۵]

۱-۹-۲- معرفی الکترولیت های پایه آبی و معرفی مزایای آن

اجزای یک سلول الکتروشیمیایی شامل یک الکترولیت و دو الکترود کاتد و آند است. الکترولیت معمولاً محلول آبی یا حلال دیگری است که یون‌ها در آن حل می‌شوند. نمک‌های مذاب مانند کلرید سدیم نیز می‌توانند به‌عنوان الکترولیت استفاده شوند. هنگامی که الکترودها تحت یک ولتاژ خارجی قرار می‌گیرند یون‌های موجود در الکترولیت جذب الکترود با بار مخالف می‌شوند، جایی

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

که واکنش‌های انتقال بار (فارادایک یا ردوکس) اتفاق می‌افتد. یکی از کاربردهای سلول الکترولیتی شارژ باتری‌های قابل‌شارژ از طریق فرایند الکترولیز است. این باتری‌ها موقع استفاده مانند یک سلول ولتائی عمل می‌کنند اما زمان شارژ شدن نقش یک سلول الکترولیتی را بازی می‌کنند.

الکترولیت‌های آبی به دلیل خاصیت غیر قابل‌اشتعال بودن بسیار موردتوجه واقع شده‌اند، زیرا برخلاف الکترولیت‌های غیر آبی، در فرایندهای ساخت، این نوع از الکترولیت‌ها نسبت به رطوبت حساس نبوده و باعث می‌شود کار با آنها راحت‌تر و ارزان‌تر شود، اما بزرگ‌ترین چالش با این نوع از الکترولیت‌ها، حفظ عملکرد آنهاست.

اگر ولتاژ زیادی به آب وارد شود، ملکول‌های آب الکترولیز شده و به هیدروژن و اکسیژن شکسته می‌شوند. این یک مشکل اساسی در الکترولیت‌های آبی است؛ چرا که در طی فرایند الکترولیز، الکترولیت آبی مصرف می‌شود که این پدیده منجر خواهد شد تا الکترولیت‌های آبی دارای یک محدوده ولتاژ کوچک شوند.

در واقع باتری‌های آبی از الکترولیت با پایه آب شامل نمک و روی تشکیل شده است. البته باتری‌های مبتنی بر آب ممکن است به نظرتان آشنا برسد. در گذشته نیز نمونه‌هایی با این فناوری توسعه داده شده بود، اما تمام آنها مشکل چگالی داشتند. به عبارتی نسبت به نمونه جدید، با حجم مشخص، میزان انرژی کمتری را تولید می‌کردند. از سوی دیگر نمونه‌های قبلی دارای قطعات با پتانسیل انفجار بیشتری بودند. اینبار به نظر می‌رسد دانشمندان مشکلات یادشده را حل کرده‌اند.

یک مشکل دیگر که در باتری‌های آبی گذشته بسیار شایع بود میزان خوردگی بالای این ماده در استفاده‌های گوناگون بود که دانشمندان با استفاده از ترکیب آب نمک بسیار غلیظ بر این مشکل فائق آمدند و به کامل شدن این باتری کمک شایانی کردند [۴۷].

یکی از محققان این پروژه بعد از توسعه دادن این باتری آبی اعلام کرد به لحاظ چگالی انرژی این باتری با باتری‌های لیتیوم – یونی می‌تواند به راحتی رقابت کند و این در شرایطی است که به لحاظ آتش‌سوزی و انفجار کاملاً ایمن هستند.

دانشمندان امیدوارند در آینده این باتری بتواند جایگزین مناسبی برای باتری‌های لیتیوم – یون شود و تولیدکنندگان قطعات الکترونیکی مطمئن باشند از یه باتری امن در حال استفاده‌اند [۴۸].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۹-۳- معرفی الکترولیت‌های آلی (حلال آلی اپروتیک) کاربردی در باتری‌های لیتیم هوا

محلول‌های الکترولیتی که عموماً در باتری‌های لیتیومی استفاده می‌شوند شامل نمک‌های لیتیوم، حلال‌های آلی و برخی مواد افزودنی هستند. حلال‌های آلی غالباً کربنات‌های حلقوی مانند اتیلن کربنات و پروپیلن کربنات و یا کربنات‌های زنجیره‌ای مانند دی‌اتیل کربنات و اتیل متیل کربنات هستند. ترکیب و نسبت‌های کربنات‌ها پیامدهای مهمی برای تراکم انرژی، عمر و ایمنی باتری‌های لیتیوم یونی دارد.

الکترولیت‌های این گروه محلول‌های غیرآبی (آلی از نوع اپروتیک) است؛ این نوع الکترولیت به دلیل نبود واکنش لیتیوم با آب، خیلی ایمن‌تر از الکترولیت‌های آبی است. حسن دیگر این نوع باتری‌ها قابلیت شارژ مجدد است. دو واکنشی که منجر به تولید انرژی در این نوع از باتری‌ها می‌شوند به شکل زیر است:

$$2Li + {}^{1}/_{2}\, O_2 \leftrightarrow Li_2O$$

$$2Li + O_2 \leftrightarrow Li_2O_2$$

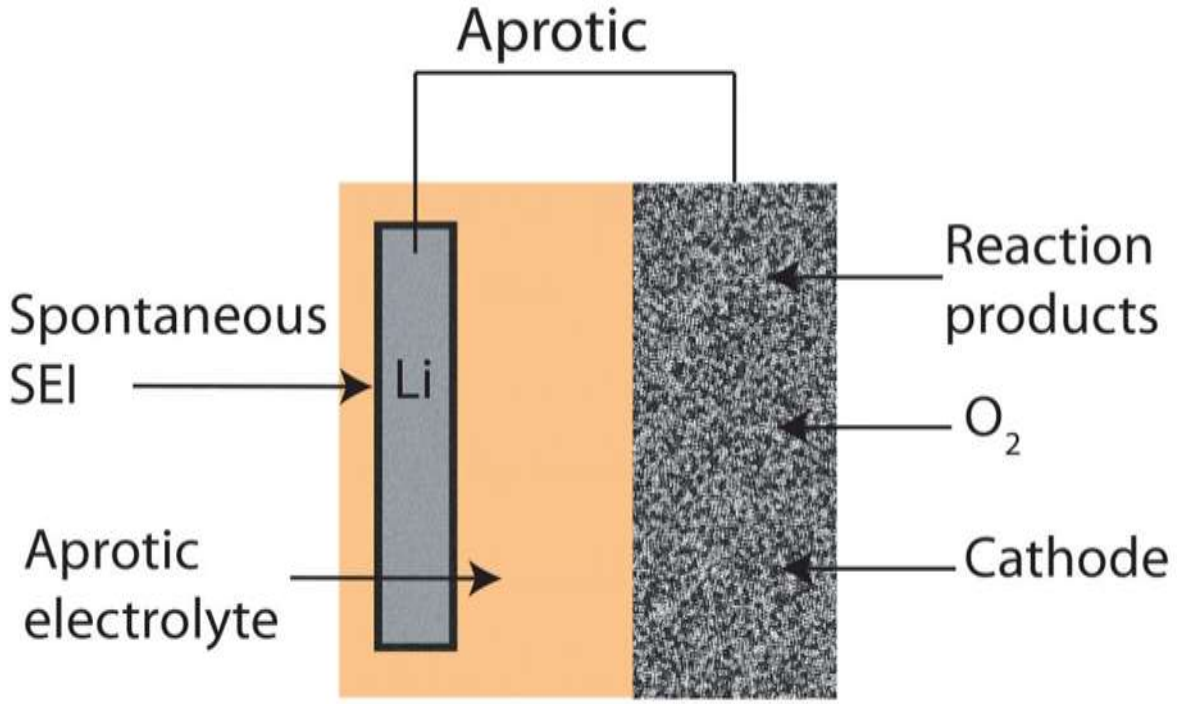
در آند هنگام دشارژ، اکسیداسیون لیتیوم صورت می‌گیرد؛ لیتیوم تبدیل به یون شده و از طریق الکترولیت به سمت کاتد می‌رود. در کاتد اکسیژن احیا می‌شود و با یون لیتیوم تشکیل یک اکسید می‌دهد. دو فرمول زیر واکنش‌ها را نشان می‌دهند:

$$\text{Anode:} \quad Li \leftrightarrow Li^+ + e$$

$$\text{Cathode:} \quad 2\,Li^+ + O_2 + 2e \leftrightarrow Li_2O_2$$

واکنش کاتدی موردنظر می‌تواند خیلی پیچیده‌تر نیز باشد اما درمجموع در این واکنش یک اکسید از لیتیوم که عمدتاً دارای فرمول شیمیایی متفاوتی است، تشکیل می‌شود. محصول اکسیدی صرف‌نظر از نوع آن و طریقه تشکیل، از احیای اکسیژن ایجاد می‌شود. این محصولات اکسیدی واکنش کاتدی (صرف‌نظر از فرمول شیمیایی و ...)، همگی در الکترولیت آلی غیر قابل‌حل و همچنین عایق الکترونی هستند [۴۹, ۵۰].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



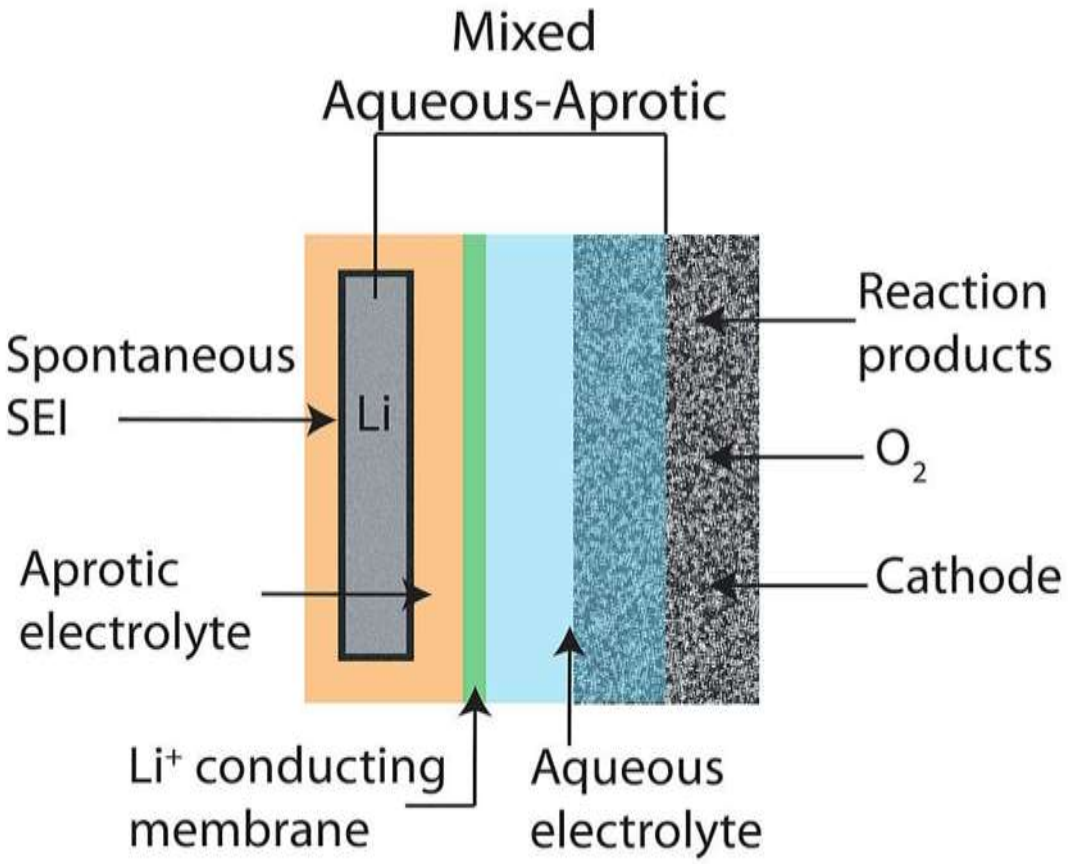
شکل ۱-۶ الکترولیت های آپروتیک [۴۹]

۱-۹-۴- الکترولیت هیبریدی در باتری لیتیم

طبق آنچه که گفته شد، دو نوع الکترولیت قبل دارای معایبی بودند. الکترولیت‌های غیرآبی قابلیت انحلال اکسید لیتیوم را ندارند و الکترولیت‌های آبی واکنش شدیدی با آب می‌دهند. به‌منظور برطرف کردن این معایب، نوع جدیدی از باتری‌ها طراحی شد که دارای دو نوع الکترولیت آبی و غیرآبی هستند.

در این نوع، آند (فلز لیتیوم) در تماس با الکترولیت غیرآبی است و کاتد به‌منظور جلوگیری از رسوب اکسید لیتیوم و مسدود کردن حفرات کاتد، در تماس با الکترولیت آبی است. این دو قسمت توسط یک غشای میانی (LISICON[۱]) جدا شده‌اند که البته قابلیت عبور یون‌های لیتیوم از آن وجود دارد [۵۱, ۵۲].

۱ نوعی غشای میانی مورداستفاده در باتری‌های لیتیمی

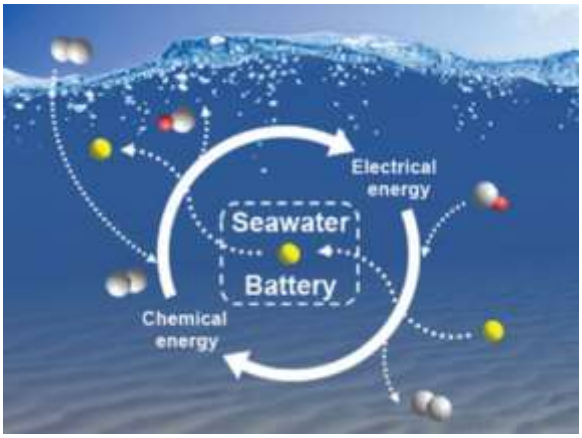


شکل ۱-۷ الکترولیت‌های هیبریدی [۵۱]

۱-۹-۵- استفاده از آب دریا به‌عنوان الکترولیت باتری‌های نوین

استفاده از آب دریا به‌عنوان الکترولیت به جای آب چندبار تصفیه‌شده (Highly Purified Water) راهی دیگر برای کاهش شارژ باتری پیشنهاد شده است. مزایای باتری‌های ساخته‌شده از آب دریا اینگونه است که این باتری‌های جدید، ظرفیت بیشتری نسبت به انواع لیتیومی یونی فعلی دارند. باتری‌های جدید قادرند ظرف تنها ۵ دقیقه شارژ، تا ۸۰ درصد از ظرفیت خود را پر کنند. مهم‌تر از همه آن است که تولید این باتری‌ها، ارزان‌تر از بقیه تمام شده و همین امر در نهایت به کاهش قیمت خودروهای الکترونیکی و گجت‌ها منجر می‌شود [۵۳, ۵۴].

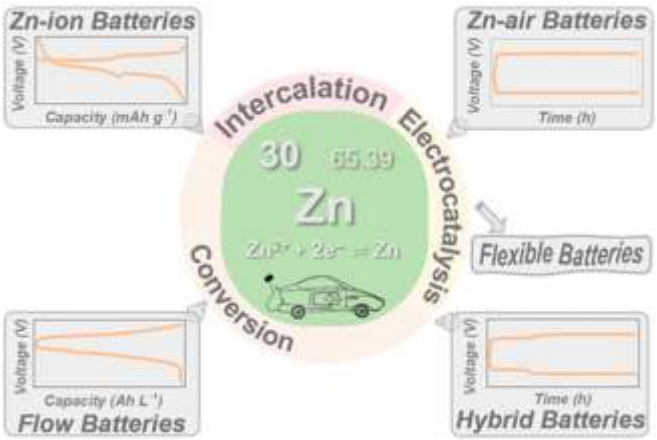
DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۱-۸ الکترولیت باتری با آب دریا [۵۳].

۱-۹-۶- الکترولیت‌های پایه آبی روی[1]

علم الکتروشیمی بر پایه بر روی، اخیراً به‌عنوان یکی از جدیدترین راه‌ها برای به چالش کشیدن وضعیت فناوری‌های باتری لیتیمی موردتوجه قرار گرفته است. علاوه بر منابع فراوان روی در دنیا، واکنش‌پذیری متوسط و سازگاری الکترولیت آبی روی، باعث ایمنی بیشتر و هزینه کمتر در باتری‌ها می‌شود. از همه مهم‌تر، کاهش دو الکترونی زوج‌های Zn^{2+}/Zn می‌تواند ظرفیت نظری و چگالی انرژی بالاتری را در باتری‌ها به‌وجود آورد. استفاده از الکترولیت‌های بر پایه روی به جای الکترولیت‌های دارای حلال شیمیایی باعث کاهش خطر آتش‌سوزی در باتری‌ها نیز می‌شود [۵۵].



شکل ۱-۹ الکترولیت پایه آبی- روی [۵۵].

1 Zinc

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱-۹-۷- استفاده از مواد بر پایه $LiPF_6$ و پلی‌پروپیلن کربنات به‌عنوان الکترولیت باتری

در باتری‌های لیتیمی عموماً الکترولیت نمک لیتیم در یک حلال ترکیب آلی است. عموماً الکترولیت مخلوطی از ترکیبات عالی کربنی مثل اتیلن کربنات یا دی‌اتیل کربنات است که شامل کمپلکس شیمیایی یون‌های لیتیم می‌شود. این الکتورلیت‌ها که معمولاً در آب حل نمی‌شوند و محلول آبی تشکیل نمی‌دهند، عموماً از نمک‌های آنیون غیر هماهنگ مثل $LiPF_6$ و پلی‌پروپیلن کربنات استفاده می‌کنند. بسته به نوع مواد استفاده‌شده در باتری‌های لیتیمی، ولتاژ، چگالی انرژی، طول عمر و ایمنی به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند تغییر کند. استفاده از این مواد در این نوع باتری‌ها باعث افزایش ظرفیت در باتری‌های لیتیمی می‌شود [۵۶, ۵۷].

۱-۹-۸- استفاده از گرافن و سرامیک به‌عنوان الکترولیت حالت جامد باتری

با توجه به نیاز روزافزون بشر به باتری و ذخیره‌سازی انرژی، اشتیاق فراوانی برای جایگزینی الکترولیت‌های مایع باتری‌های کنونی با مواد سرامیکی وجود دارد، چون امنیت بیشتری داشته و چگالی انرژی بیشتری را فراهم می‌کنند. سرامیک‌ها بسیار شکننده هستند و احتمال خرد شدن آنها حین فرایند تولید وجود دارد؛ محققان برای جلوگیری از این رخداد، گرافن که مقاومت فوق‌العاده بالایی دارد را به سرامیک القا کرده و سختی آن را در عین حفظ خصوصیات الکترونیکی موردنیاز برای عملکرد الکترولیت افزایش دادند. لازم به یادآوری است که آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از گرافن خللی در خصوصیات الکتریکی ماده ایجاد نکرده و سختی ماده کامپوزیتی تولیدشده بیش از دو برابر سرامیک است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به کمک نانوکامپوزیت‌ها می‌توان الکترولیت‌های حالت جامد امن‌تر با خصوصیات مکانیکی موردنیاز برای استفاده در تجهیزات روزمره با امنیت بیشتر ساخت [۵۸, ۵۹].

۱-۹-۹- الکترولیت بر پایه کربنات‌ها

افزایش طول عمر در باتری‌های یون لیتیوم از چندین دهه گذشته یکی از چالش‌برانگیزترین مشکلات در توسعه علم ذخیره‌سازی انرژی است. برای دستیابی به این هدف، استفاده از افزودنی‌های مناسب به الکترولیت این نوع باتری یکی از ساده‌ترین، مقرون‌به‌صرفه‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای بهبود چرخه عمر و بهبود ظرفیت باتری‌های لیتیوم یونی است. نقش اصلی افزودنی‌ها به الکترولیت جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته در حلال‌های الکترولیت و مشکلات به‌وجودآمده در نمک‌هایی است که در حین شارژ باتری در الکترولیت جامد باتری رخ می‌دهد. بنابراین، استفاده از مواد بر پایه کربنات‌ها مانند (prop-1-ene-1.3-sultone

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

(PES)) می‌تواند اثر بسزایی در رسیدن به این اهداف باشد. استفاده از این ماده می‌تواند باعث جلوگیری از کاهش ظرفیت اولیه و حفظ طول عمر بهتر در باتری شود [۶۰].

۱-۹-۱۰- الکترولیت پلی‌سیلوکسان

استفاده از الکترولیت‌های پلیمری در باتری‌ها به دلیل وجود برخی مزایا مانند فراورش و تشکیل فیلم‌های انعطاف‌پذیر در باتری‌های لیتیمی موردتوجه قرار گرفته است. الکترولیت‌های پلیمری باعث کاهش رشد دندریت، افزایش پایداری و چرخه شارژ-دشارژ، کاهش واکنش‌پذیری به نسبت الکترولیت مایع، افزایش ایمنی و عملکرد بهتر در باتری می‌شوند. ازاین‌رو، پلیمر پلی‌سیلوکسان به‌عنوان یک الکترولیت پلیمری مناسب در باتری‌های لیتیمی مورداستفاده قرار می‌گیرد [۶۱].

۱-۹-۱۱- الکترولیت $LiPF_4C_2O_4$ به‌منظور بهبود کارایی باتری

به‌منظور بهبود عملکرد باتری‌های لیتیمی الکترولیت‌هایی که معمولاً استفاده می‌شوند از نمک لیتیم مانند لیتیم هگزافلوروفسفات ($LiPF_6$)، لیتیم تترافلوئوروبات ($LiBF_4$)، لیتیم پرکلرات ($LiClO_4$) و ... هستند، که در حلال‌های عالی مانند اتیلن کربنات، کربنات دی‌متیل، دی‌اتیل و محلول کربنات حل شده‌اند. الکترولیت مورداستفاده در آنها یک محلول غیر آبی است، زیرا در محلول آبی (H_2O)، لیتیم (فلز قلیایی بسیار واکنش‌پذیر) با آب به فرم هیدروکسید لیتیم و گاز هیدروژن به شدت واکنش نشان می‌دهد، که این امر اصلاً مدنظر نیست.

یک نمک جدید برای الکترولیت‌های باتری لیتیوم یون، لیتیم تترا فلوروکسالاتوفسفات ($LiPF_4\ (C2O_4)$) است. رسانایی بالا، پایداری الکتروشیمیایی و حرارتی و عملکرد شارژ بهتر در مقایسه با الکترولیت استاندارد $LiPF_6$ از مزایای اصلی این ماده است [۶۲].

۱-۹-۱۲- پلیمرهای نانوکامپوزیتی به‌عنوان الکترولیت جامد

الکترولیت‌های پلیمری جامد در باتری‌های قابل‌شارژ لیتیم به‌عنوان جایگزینی برای الکترولیت‌های مایع دارای بیشترین کاربرد است. مزایایی همچون کاهش نشت الکترولیت، دانسیته انرژی بالاتر، قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتر و ایمنی بالاتر توجه بسیاری از محققین را به سوی توسعه باتری‌های لیتیم پلیمری و دیگر وسایل الکتروشیمیایی مانند ابرخازن‌ها و حسگرها جلب کرد. در باتری‌های لیتیمی الکترولیت پلیمری نانوکامپوزیتی به‌عنوان غشا جداکننده، شرایط مناسب و مزایایی از قبیل هدایت یونی بالا، عدد

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

انتقال کاتیون بالا، پایداری ابعادی خوب، پایداری الکتروشیمیایی بالا و سازگاری شیمیایی با آند لیتیم و مواد کاتدی و بالاخره پایداری مکانیکی را دارند [۶۳].

۱-۹-۱۳- استفاده از الکترولیت‌های شبه جامد[1] برای بهبود ساختار باتری‌های لیتیمی

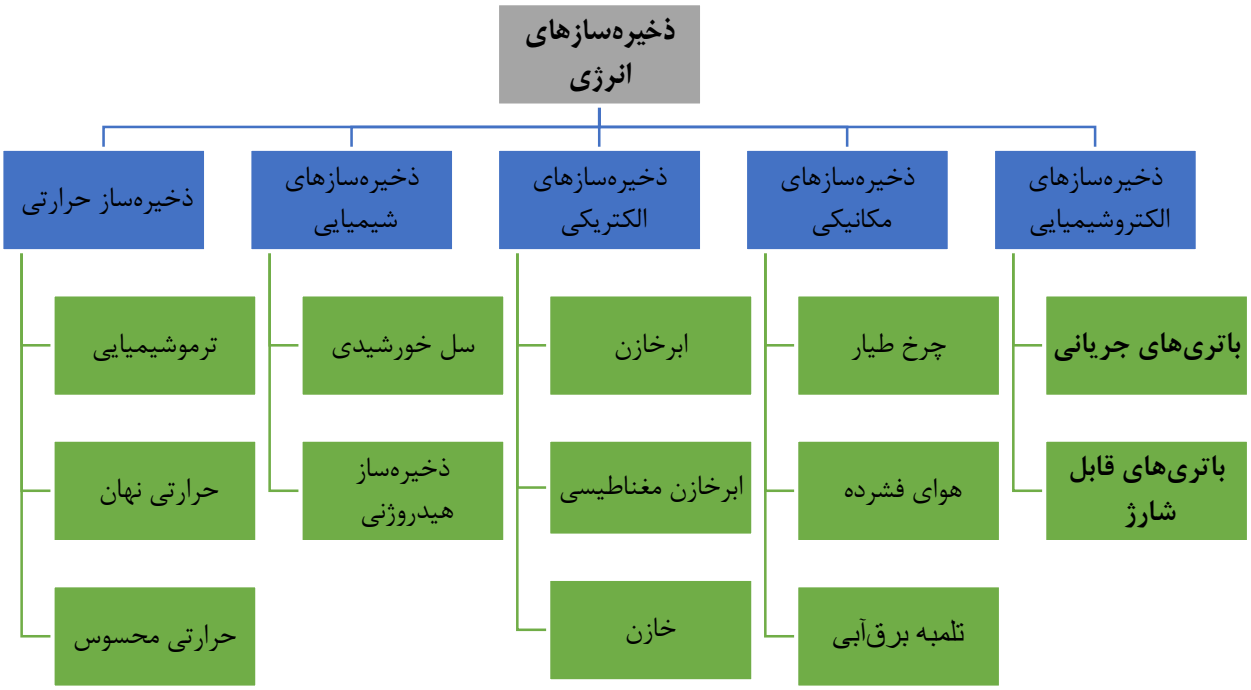
مایعات یونی به دلیل هدایت یونی بالا، پایداری شیمیایی و خواص پایداری حرارتی به‌عنوان نویدبخش‌ترین الکترولیت‌ها برای باتری‌های لیتیوم-یون معرفی شده‌اند. از طرفی استفاده از الکترولیت‌های نیمه‌جامد مانند الکترولیت‌های ژلی، الکترولیت‌های بلوری پلاستیکی یونی، الکترولیت‌های هیبریدی و الکترولیت‌های رسانای تک‌یونی برای باتری‌های لیتیوم-یون موردتوجه بسیاری از متخصصان حوزه ذخیره‌سازی انرژی قرار گرفته است. خاصیت اشتعال‌پذیری بسیار کم، هدایت یونی بالا، انعطاف‌پذیری بالا و مهم‌تر از همه قابلیت افزایش ظرفیت در باتری مهم‌ترین مزایای این مواد در الکترولیت باتری‌های لیتیمی است [۶۴].

۱-۱۰- جمع‌بندی و درخت فناوری:

با توجه به مطالب ارائه‌شده در این فصل، اهمیت باتری‌ها و ذخیره‌سازها در بخش‌های مختلف زندگی روزمره مشخص شده است. از طرفی، بهینه‌سازی در نوع مواد مورداستفاده در باتری و همچنین قابلیت بازیافت در باتری‌ها برای ادامه استفاده از این نوع حامل‌های انرژی قابل‌تأمل است. ازاین‌رو، بهبود کیفیت الکترودها، الکترولیت‌ها، جداکننده‌ها در باتری بر پارامترهای اساسی آن اثر زیادی دارد. همچنین استفاده از علوم نوین مانند نانو، پلیمرهای سنتزی‌شده و غیره به‌منظور نیل به این اهداف در دستور کار پژوهشگران این حوزه قرار گرفته است. به‌طورکلی کاهش هزینه‌های اقتصادی، اثرات محیط زیستی، افزایش طول عمر باتری، افزایش دامنه شارژ و دشارژ باتری از مهم‌ترین مباحثی است که سال‌های اخیر توسط مراکز تولیدکننده و دانشمندان حوزه ذخیره‌سازها موردبررسی قرار گرفته است که در شکل ۱-۱۰ مشاهده می‌شود.

1 semi-solid electrolytes

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۱-۱۰ درخت فناوری انواع ذخیره‌سازهای انرژی

۱-۱۱- پروژه‌های پیشنهادی درزمینه ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی

باتری‌ها کاربرد گسترده‌ای در صنعت برق به‌ویژه در موارد استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر همواره با معضلی همچون نوسان تولید در طول زمان همراه است. استفاده از باتری‌ها به‌منظور ذخیره انرژی در پیک تولید و آزادسازی آن در پیک مصرف است. از طرفی کاربردهای خاص آن در خودرو برقی از موارد ویژه پیشرفت این تکنولوژی است. همچنین از کاربردهای ویژه باتری‌ها می‌توان به صنعت مخابرات و ایستگاه‌های مرکزی اشاره نمود که برقراری ارتباطات شبکه مخابراتی را ۲۴ ساعته حتی در زمان قطعی برق فراهم می‌کند. امروزه کاربرد باتری به حدی گسترده شده است که در ساختمان‌های مسکونی با استفاده از تجهیز UPS نیز به‌صورت ۲۴ ساعت و در زمان خاموشی‌ها نیز امکان استفاده از تجهیزات برقی را فراهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

می‌سازند. به‌علاوه، کاربردهای ویژه باتری در صنعت موبایل، خودروهای سواری، لوازم صوتی و تصویری قابل‌حمل و پاوربانک‌ها نیز از موارد ویژه این کاربردها است. فهرست پروژه‌های کاربردی حیطه ذخیره‌سازهای الکتروشیمیایی به ترتیب الویت به شرح ذیل است.

۱. مکانیسم‌های نوین عملکرد باتری‌ها و تعیین نقش کلیدی اجزای باتری به‌ویژه الکترود و الکترولیت
۲. مکانیسم‌ها نوین و کاربردی مواد آندی و کاتدی نانو
۳. نوآوری در ساختار الکترود و الکترولیت به‌منظور بهبود عملکرد و طول عمر باتری‌ها
۴. طراحی باتری‌های آلومینیومی نوین با دو ویژگی زمان نگهداری شارژ بالا و وزن بسیار سبک در کاربردهای هواپیمایی
۵. استفاده از نانوذرات در ساختار الکترود باتری‌ها به دلیل افزایش سطح قابل‌دسترس الکترودها و به دنبال آن افزایش ظرفیت باتری و سرعت چرخه شارژ–تخلیه
۶. کاربرد الکترودهای گرافیتی به‌منظور افزایش ظرفیت در کاربرد خودرو برقی
۷. کاربرد پلیمرهای صنعتی (Industrial Polymer) نظیر PET، پلی‌آمید، پلیمرهای سولفیدی، ... به‌عنوان الکترود بهینه برای باتری‌های یون لیتیم
۸. کاربرد الکترودهای پایه آبی روی (Zinc-Based Aqueous Batteries) به جای حلال شیمیایی به‌منظور جلوگیری از خطر آتش‌سوزی
۹. کاربرد گرافن و سرامیک به‌عنوان الکترولیت حالت جامد باتری‌ها به‌منظور جلوگیری از خطر
۱۰. کاربرد الکترولیت‌های شبه جامد (Semi-solid Electrolyte) برای بهبود ساختار باتری‌های لیتیمی
۱۱. کاربرد مواد بر پایه سولفور در ساختار الکترود باتری لیتیم و افزایش زمان شارژ
۱۲. کاربرد الکترودهای پلیمری نرم و متخلخل با سوراخ‌های از ذرات سرامیکی پرشده به‌منظور افزایش ظرفیت باتری
۱۳. استفاده از پلی‌پیرول در ساختار الکترود و افزایش CNT به این ساختار به‌منظور بهبود کارایی
۱۴. به‌کارگیری آند نانوآلیاژ سه‌بعدی از جنس روی–منگنز و استفاده از آب دریا به‌عنوان الکترولیت به‌منظور افزایش تعداد چرخه‌های شارژ–تخلیه
۱۵. کاربرد فیبر کربنی در مقیاس نانو و میکرو (Nano and Micro Scale Carbon Fibers) به‌منظور بهبود کارایی باتری‌ها
۱۶. استفاده از دی‌کادمیم استانات (Di Cadmium Stannite) به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترودی به‌منظور افزایش ولتاژ باتری
۱۷. استفاده از ارگانو سولفور به‌عنوان مواد نوین ساختار الکترودی به‌منظور افزایش ظرفیت شارژ
۱۸. کابرد غشاهای نانوفیبری به‌عنوان الکترود باتری‌ها (Self-standing Nanofiber Membrane Electrodes) به‌منظور افزایش تعدا چرخه شارژ–تخلیه
۱۹. کابرد الکترودهای دوقطبی (Bipolar Electrodes) از جنس کربن بلک و پلیمرهای غیر هادی به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید باتری
۲۰. تولید الکترود باتری‌ها بر پایه الاژیک اسید به‌منظور افزایش خواص برگشت‌پذیری باتری
۲۱. استفاده از Carbonaceous Multi Scale Cellular Foam به‌عنوان یک الکترود پایدار در ساخت باتری‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲۲. جایگزینی الکترولیت‌های مایع با الکترولیت جامد (الکترولیت شیشه ای) در باتری لیتیمی به‌منظور جلوگیری از بروز انفجار، افزایش تعداد چرخه شارژ–تخلیه، کاهش هزینه تولید الکترولیت‌های پایه آبی و معرفی مزایای آن
۲۳. الکترولیت‌های آلی (حلال آلی اپروتیک) کاربردی در باتری‌های لیتیم هوا به‌منظور کاهش خطر انفجار (ناشی از تماس لیتیم با الکترولیت آبی)
۲۴. الکترولیت هیبریدی در باتری لیتیم هوا و روش‌های جداسازی توسط غشای میانی LISICON
۲۵. استفاده از آب دریا به‌عنوان الکترولیت باتری‌های نوین
۲۶. استفاده از مواد بر پایه $LiPF_6$ و پلی‌پروپیلن کربنات به‌عنوان الکترولیت ساختاری باتری‌های لیتیمی به‌منظور افزایش ظرفیت
۲۷. استفاده از فلورید آهن و پلیمرهای حالت جامد به‌عنوان الکترود به‌منظور بهبود عملکرد باتری‌های لیتیمی
۲۸. کاربرد الکترولیت بر پایه کربنات‌ها برای ساختار باتری‌های گرافیتی
۲۹. استفاده از الکترولیت پلی‌سیلوکسان به‌منظور بهبود کارایی باتری‌های لیتیمی
۳۰. استفاده از الکترولیت $LiPF_4C_2O_4$ به‌منظور بهبود کارایی باتری‌های لیتیمی
۳۱. استفاده از پلیمرهای نانو کامپوزیتی به‌عنوان الکترولیت حالت جامد باتری‌های لیتیمی
۳۲. طراحی الکترودهای نوین کربن فعال (پودر کربنی+چسب + افزودنی مانند CNT، گرافن، مواد ابر رسانا، ...)
۳۳. الکترود لیتیم–کربن نانو تیوپ (اتصال هر قطره لیتیم به یک کربن نانوتیوپ به‌منظور کوتاه کردن مسیر حرکت الکترون)
۳۴. روش جایگزینی گرافیت ساختار الکترود با سیلیکون به‌منظور شارژدهی سریع و بازدهی بالا
۳۵. روش تولید الکترودهای نوین بر پایه چیتین استخراج‌شده از پوست میگو به‌منظور افزایش ظرفیت و سرعت شارژ
۳۶. الکترود آند از جنس مس (به جای گرافیت در باتری‌های لیتیمی) به‌منظور افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و رسانایی
۳۷. الکترود آند سیلیکونی و کاربرد آن در باتری‌های لیتیمی به‌منظور افزایش کارایی و بازده

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

فصل ۲ روش‌های نوین تولید انرژی بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۱- مقدمه

تولید برق در دنیا هر سال حدود ۴/۲ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین طبق برآوردهای صورت‌گرفته از ۱۶ میلیارد و ۴۲۴ میلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۰۴ به ۳۰ میلیارد و ۳۴۶ میلیون کیلووات ساعت در سال ۲۰۳۰ خواهد رسید. این تفاوت در عین حال که حاکی از رشد نسبی تأسیسات زیرساختی تولیدات برق در بیشتر کشورهای توسعه یافته است، نشان از افزایش روزافزون استانداردهای زندگی و استفاده از وسایل روشنایی و سایر وسایل برقی مدرن در دنیا دارد.

تولید برق شامل ایجاد و خلق الکتریسیته می‌شود که با استفاده از توربین‌های متصل به ژنراتورهای برقی صورت می‌گیرد. این توربین‌های مکانیکی بیشترین برق تجاری موردنیاز را تأمین می‌کنند. در درون توربین‌ها مایعی به‌عنوان حامل انرژی وجود دارد. این مایع‌ها عمدتاً از بخار آبی حاصل می‌شوند که توسط انرژی حاصل از انشقاق و شکاف هسته‌ای یا گرمای حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی (زغال‌سنگ، گاز طبیعی یا نفت) به نقطه جوش می‌رسد. البته درحال‌حاضر تعدادی از نیروگاه‌های جدید از خورشید به‌عنوان منبع حرارت استفاده می‌کنند؛ شیارهای سهمی‌شکل خورشیدی و برج‌های انرژی خورشیدی نور خورشید را برای گرم کردن این مایع و تولید بخار از آن به‌کار می‌برند.

منبع تجدیدپذیر دیگری که برای تولید گرما و به حرکت در آوردن توربین‌ها از آن استفاده می‌شود انرژی گرمایی زمین است. بخار تحت فشار حرارت زیرزمینی از زمین بیرون آمده و توربین‌ها را به حرکت در می‌آورد. پره‌های توربین آبی که توسط آب جاری از سدهای برق آبی یا نیروهای ناشی از جزر و مد به حرکت در می‌آیند منبع دیگری برای تولید برق هستند.

اکثر توربین‌های بادی از بادهایی که به‌طور طبیعی می‌وزند برق تولید می‌کنند. برج‌های خورشیدی هم از بادی که به‌طور مصنوعی درون دودکش‌ها با حرارت ناشی از نور خورشید جریان دارند کار می‌کنند [۶۵].

توربین‌های گازی هم مستقیماً به‌وسیله گازهای ناشی از سوخت نفت یا گاز طبیعی به حرکت در می‌آیند. از سوی دیگر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نیز با بخار و گاز فعالیت می‌کنند. آنها از سوختن گاز طبیعی در توربین‌های گازی انرژی تولید کرده و از گرمای اضافی این سوخت برای تولید برق از بخار استفاده می‌کنند. این نیروگاه‌ها بازدهی بالای ۶۰ در صد دارند.

از انواع دیگر تکنولوژی‌های موردمطالعه برای تولید برق می‌توان به تولید حالت جامد اشاره کرد که سهم ویژه‌ای در مصارف و نیازهای سیار و متحرک دارد. فضای مورداستفاده‌ی آنها عمدتاً ابزارهای ترموالکتریک (TE) هستند. با وجود اینکه سیستم گرما یونی

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

(TI) و TPV [1]به اندازه سیستم‌های TE پیشرفت کرده‌اند اما چنان که انتظار می‌رود سیستم‌های TE نسبت به سیستم‌های TI و TPV در دماهای پایین‌تری به‌کار می‌روند. وسایل پیزوالکتریکی نیز برای تولید انرژی از نیروی کشش مکانیکی استفاده می‌کنند.

تولید برق الکتروشیمیایی نیز در مصارف قابل‌انتقال بسیار مهم است. درحال‌حاضر بیشترین میزان انرژی الکتروشیمیایی از سلول‌های الکتروشیمیایی بسته (باتری‌ها) به‌دست می‌آید که مسلماً بیشتر به‌عنوان سیستم‌های ذخیره عمل می‌کنند تا سیستم‌های تولید. اما مطالعه و تحقیق برای گسترش سیستم‌های الکتروشیمیایی که تحت عنوان سلول‌های سوختی شناخته شده‌اند در چند سال اخیر افزایش قابل‌توجهی یافته است. سلول‌های سوختی می‌توانند برای استخراج انرژی چه از سوخت‌های طبیعی و چه از سوخت‌های مصنوعی (به‌طور عمده هیدروژن الکترولیتی) به‌کار روند. بنابراین می‌تواند هم به‌عنوان سیستم‌های تولیدی و هم به‌عنوان سیستم وابسته از آن استفاده کرد [۶۶].

۲-۲- الکتروشیمی و تولید انرژی الکتریکی

انرژی الکتریکی، پرکاربردترین شکل انرژی در زندگی امروزی است. از انتقال یک پیام عصبی تا صنایع الکترونیک، حمل و نقل، مهندسی پزشکی، روشنایی خانه‌ها و... همگی به انرژی الکتریکی وابسته‌اند. ازاین‌رو، همهٔ کشورهای جهان تلاش می‌کنند راه‌هایی برای تولید انرژی الکتریکی ارزان و پاک بیابند. امروزه بخش عمدهٔ انرژی الکتریکی از انجام واکنش‌های شیمیایی که با داد و ستد الکترون همراه‌اند، تأمین می‌شود. آگاهی از چگونگی انجام این نوع واکنش‌ها و دانش الکتروشیمی می‌تواند راهکارهای مناسبی برای رفع چالشِ کمبود انرژی ارائه دهد.

تا چندین سال پیش تصور بر این بود که نخستین بار دانشمندان ایتالیایی به نام‌های الکساندر ولتا و لوئیجی گالوانی باتری را اختراع کردند. آنها از قرار دادن دو فلز در محلولی از نمک خوراکی، جریان الکتریکی تولید کردند. اما جالب است بدانید که این دو دانشمند برای ساختن باتری، از همان فلزهایی استفاده کردند که حدود ۲۰۰۰ سال پیش، ایرانیان برای ساختن باتری به‌کار برده بودند. شواهد باستانی نشان می‌دهد که ایرانیان باستان با استفاده از ظرف‌های سفالی، قطعه‌هایی از فلزهای آهن و مس همراه با محلول نمک خوراکی یا سرکه، دستگاهی برای تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریکی ساخته بودند. اگرچه به نظر می‌رسد ایرانیان از این انرژی برای آبکاری اشیای فلزی بهره می‌بردند، اما امروزه انرژی الکتریکی کاربردهای بسیار گسترده‌ای در زندگی پیدا کرده است.

1 Thermophotovoltaic

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

نیاز روزافزون جامعهٔ بشری به انرژی الکتریکی، شیمی‌دان‌ها را بر آن داشت تا با بهره‌گیری از اصول الکتروشیمی به طراحی باتری‌هایی با کارایی بالا همت گمارند. باتری‌هایی که افزون بر تولید انرژی بیشتر، آلاینده‌های کمتری ایجاد کنند. آشنایی با این مباحث به درک مفاهیمی مانند اکسایش، کاهش، سلول‌های الکتروشیمیایی و چگونگی عملکرد آنها نیاز دارد [۶۷, ۶۸].

۲-۲-۱- سلول الکتروشیمیایی

مشخص شد که فلزها قدرت کاهندگی متفاوتی دارند. برای نمونه، روی، کاهنده‌تر از مس است. دستگاهی که بر اساس قدرت کاهندگی فلزها، انرژی الکتریکی تولید می‌کند، نوعی سلول الکتروشیمیایی است. فرض کنید که یک تیغه از جنس فلز روی درون یک بشر دارای محلول آبی یون‌های روی (مانند محلول روی سولفات) قرار دارد. به این مجموعه یک نیم‌سلول می‌گویند.

در این نیم‌سلول برای برقراری تعادل، تعدادی از اتم‌های Zn، الکترون‌های خود را روی سطح تیغهٔ روی (رسانای الکترونی که به آن الکترود گفته می‌شود) می‌گذارند و به‌صورت یون‌های= Zn^{+2} وارد محلول می‌شوند. در نتیجه بین تیغهٔ روی (الکترود) و محلول (الکترولیت)، اختلاف پتانسیلی به‌وجود می‌آید. پتانسیل الکترودی نامی است که بر این اختلاف پتانسیل نهاده‌اند [۶۹].

۲-۲-۲- انواع سلول‌های الکتروشیمیایی

سلول‌های الکتروشیمیایی را به دو دسته طبقه‌بندی می‌کنند. دستهٔ نخست که به سلول‌های گالوانی شهرت دارند، سلول‌هایی هستند که هر دو نیم‌واکنش الکترودی آنها به‌طور خود به خود انجام می‌گیرد و بر اثر وقوع آنها انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. درحالی‌که در دستهٔ دوم که سلول‌های الکترولیتی نامیده شده‌اند، انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی تبدیل می‌شود. در این نوع سلول‌ها با اعمال یک ولتاژ بیرونی، هر دو نیم‌واکنش الکترودی با صرف انرژی به سمت ایجاد تغییر شیمیایی دلخواه رانده می‌شوند.

۲-۲-۳- انواع سلول‌های گالوانی

ازآنجاکه در سلول‌های گالوانی انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد، از این سلول‌ها به‌عنوان منبع انرژی الکتروشیمیایی یاد می‌شود. سلول‌های گالوانی را به دو دسته تقسیم می‌کنند، سلول‌های نوع اول و سلول‌های نوع دوم. باتری‌ها و سلول‌های سوختی از جملهٔ سلول‌های نوع اول هستند. این نوع سلول‌ها با تمام شدن واکنش‌دهنده‌های موجود در آنها غیرفعال

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

می‌شوند و امکان شارژ یا پرکردن دوبارهٔ آنها وجود ندارد؛ درحالی‌که سلول‌های نوع دوم که شامل سلول‌های انباره‌ای (مانند باتری خودرو) و باتری‌های قابل‌شارژ هستند را می‌توان بارها شارژ کرد و مورداستفاده قرار داد.

۲-۳- روش‌های تولید برق بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی

سلول‌های الکتروشیمیایی که جریان الکتریکی تولید می‌کنند، سلول‌های ولتایی یا سلول‌های گالوانیک نامیده می‌شوند. یک نمونه متداول از سلول گالوانیک، یک باتری ۱٫۵ ولتی استاندارد است که برای استفاده مصرف‌کننده کاربرد دارد. یک باتری، متشکل از یک یا چند سلول است که به‌صورت موازی، سری یا سری و موازی به هم متصل شده‌اند.

علاوه بر این روش‌های دیگری وجود دارد که از مکانیسم الکتروشیمی به‌منظور تولید الکتریسیته در آن استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارت‌اند از:

- پیل‌های سوختی
- روش الکترودیالیز معکوس
- سلول‌های الکترود جامد
- استفاده از الکتروشیمی در تبدیل حرارت به الکتریسیته
- استفاده از الکتروشیمی به‌منظور تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر

هر کدام از روش‌های ذکرشده تا حدودی بسته به نوع کاربرد و میزان پیشرفت در دنیا به‌کار گرفته شده‌اند. در ادامه توضیحاتی مفصل در رابطه با نحوه عملکرد، میزان پیشرفت و چگونگی استفاده از علم الکتروشیمی در موارد یادشده بیان خواهد شد [۷۰, ۷۱].

۲-۴- تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی

مسئله ذخیره‌سازی انرژی مخصوصاً انرژی الکتریکی، یکی از موضوعات مهم صنایع برق و نیروگاه‌های تولید جریان الکتریسیته است. از الزامات شبکه برق، پایداری ولتاژ و جریان است تا به شبکه و مصرف‌کننده آسیب وارد نشود. از طرفی معایب اصلی تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر به انرژی الکتریکی را می‌توان سه موضوع اصلی (۱) عدم پایداری در میزان تولید آنها در طول روز (۲) عدم

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

یکسان بودن الگوی مصرف در طول روز توسط مشتری (۳) عدم تطابق در بعد مکانی بین محل تولید و مصرف نام برد. بنابراین یکی از مهم‌ترین مسائل چالش برانگیز در بهره‌گیری منابع انرژی تجدیدپذیر ذخیره‌سازی انرژی به‌منظور مصرف بهینه است.

علاقه عمومی به استفاده از انرژی‌های پاک از یک سو و سردرگمی برنامه‌ریزان صنعت برق در استفاده از منابع نسبتاً جدید و پردردسر انرژی مانند منابع تجدیدپذیر برای شبکه تحت فشار برق‌رسانی، تعیین الویت و انتخاب نوع تأمین این انرژی را دشوار ساخته است. از سوی دیگر، مشتریان و رسانه‌ها موضع خود را مشخص کرده‌اند که انتظار دارند باد، خورشید و دیگر منابع تجدیدپذیر انرژی، نقش عمده‌ای در تولید برق جوامع مدرن امروزی بازی کنند. این اشتیاق محرک‌هایی همچون کیفیت هوا، بهداشت عمومی و امنیت انرژی را در پشت سر خود دارد [۷۲].

طرف دیگر ماجرا، برنامه‌ریزان تأسیسات هستند که تلاش می‌کنند تقاضای فزاینده و همیشگی به انرژی الکتریکی را تأمین و بار واردشده بر شبکه توزیع و انتقال را با مصرف هماهنگ کنند. در این مورد فناوری که ایجاد پلی میان دو نقطه‌ی گسسته را نوید می‌دهد، فناوری ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی خطوط انتقال انرژی است. شبکه‌های ذخیره‌سازی انرژی مدرن، توانایی ذخیره‌سازی ده‌ها یا حتی صدها مگاوات- ساعت از انرژی را دارند و می‌توانند منابع ناپیوسته انرژی‌های تجدیدپذیر را به انتخابی مطمئن و جذاب تبدیل کنند. این فناوری به نام باتری و ابرخازن‌ها شناخته می‌شود و به نظر می‌رسد که مجموعه‌ای از مشخصات موردنیاز برای تأمین خواسته‌های مشتریان امروز و ساخت شبکه تولید انرژی پاک و فراوان در آینده را دارد.

۲-۴-۱- منابع تجدیدپذیر به‌منظور تولید انرژی الکتریکی

انرژی تجدیدپذیر انرژی سودمندی است که از منابع تجدیدپذیر به‌دست می‌آید که در مقیاس زمانی به‌طور طبیعی دوباره جایگزین می‌شوند. از جمله‌ی این منابع می‌توان به منابع خنثی کربنی (منابعی با انتشار کربن صفر) مانند: نور خورشید، باد، باران، جزر و مد، امواج و گرمایش زمین‌گرمایی اشاره کرد. لازم به یادآوری است که طبق این تعریف انرژی حاصل از زیست‌توده را نیز می‌توان معرفی کرد که وضعیت انتشار کربن آن موردبحث است. این‌گونه از منبع انرژی در برابر سوخت‌های فسیلی قرار دارد که بسیار سریع‌تر از نوع فسیلی تجدید می‌شوند. این منابع را می‌توان باد، خورشید، برق آبی و زمین گرمایی نام برد. انرژی‌های تجدیدپذیر بیشترین مورداستفاده را در چهار زمینه‌ی مهم تأمین می‌کنند: تولید برق، گرمایش و سرمایش هوا و آب، ترابری و تأمین‌سازی آب شرب نام برد [۷۳].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۴-۲- شرایط کنونی جهان، میزان پیشرفت و توجیهات فنی-اقتصادی در رابطه با منابع تجدیدپذیر

بر اساس گزارش REN21 سال ۲۰۱۷، انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ به ترتیب ۳/۱۹ درصد در مصرف انرژی جهانی انسان و ۵/۲۴ درصد در تولید برق آنها نقش داشته است. این میزان مصرف انرژی به این صورت تقسیم می‌شود: ۸/۹٪ حاصل از زیست‌توده سنتی، ۲/۴ ٪ از انرژی گرمایی (زیست‌توده مدرن، زمین‌گرمایی و گرمای خورشیدی)، ۳/۹٪ حاصل از برق آبی و ۲/۲٪ باقیمانده برق حاصل از باد، خورشید، زمین‌گرمایی و دیگر اشکال زیست‌توده است. سرمایه‌گذاری جهانی در فناوری‌های تجدیدپذیر در سال ۲۰۱۵ بیش از ۲۸۶ میلیارد دلار بوده است. در سال ۲۰۱۷، سرمایه‌گذاری جهانی در انرژی‌های تجدیدپذیر بالغ بر ۸/۲۷۹ میلیارد دلار بود که چین با ۶/۱۲۶ میلیارد دلار ۴۵٪ از سرمایه‌گذاری‌های جهانی را به خود اختصاص داده است. همچنین ایالات متحده ۵/۴۰ میلیارد دلار و اروپا ۹/۴۰میلیارد دلار بر روی انرژی‌های تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری انجام داده‌اند. در سطح جهان ۵/۱۰ میلیون شغل در ارتباط با صنایع انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد که فتوولتائیک خورشیدی بزرگ‌ترین کارفرمای این صنعت است. سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر به سرعت در حال کارآمدتر و ارزان‌تر شدن هستند و سهم آنها از کل انرژی مصرفی در حال افزایش است. در سال ۲۰۱۹، بیش از دو سوم ظرفیت برق تازه نصب‌شده در سراسر جهان، از گونه تجدیدپذیر بوده است. رشد مصرف زغال‌سنگ و نفت تا پایان سال ۲۰۲۰ ممکن است به دلیل رشد به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و گاز طبیعی پایان یابد.

حداقل۳۰ کشور در سراسر جهان وجود دارند که در سطح ملی حداقل ۲۰٪ از انرژی خود را از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌کنند. پیش‌بینی می‌شود که بازارهای ملی انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه آینده و پس از آن به شدت رشد کنند. اکنون حداقل سه کشور، یعنی ایسلند و نروژ و پاراگوئه همه برق موردنیاز خود را با به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر تولید می‌کنند و بسیاری از کشورهای دیگر هدف خود را برای رسیدن به ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر در آینده تعیین کرده‌اند. حداقل ۴۷ کشور در سراسر جهان اکنون بیش از ۵۰ درصد برق خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌کنند. برخلاف انرژی‌های فسیلی که فقط در برخی کشورهای محدود متمرکز شده‌اند، انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق جغرافیایی مختلفی گسترده شده‌اند. استقرار سریع انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های بهره‌وری انرژی منجر به امنیت چشمگیر انرژی، کاهش تغییرات آب و هوایی و منافع اقتصادی شده است. در نظرسنجی‌های بین‌المللی افکار عمومی، پشتیبانی شدیدی برای ارتقای منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی وجود دارد [۷۴].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

درحالی‌که بسیاری از پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس وسیع هستند، فناوری‌های تجدیدپذیری نیز وجود دارند که برای مناطق روستایی و دورافتاده و کشورهای درحال‌توسعه، که در آنها انرژی بیشتر در توسعه انسانی بسیار مهم است، مناسب هستند. ازآنجاکه بیشتر سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق استفاده می‌شوند، به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر معمولاً با الکتریکی کردن بیشتر سامانه‌ها و تجهیزات همراه است، چرا که این کار چندین مزیت دارد: برق را به راحتی می‌توان به گرما تبدیل کرد، برق را می‌توان به راحتی و با راندمان بالا به انرژی مکانیکی تبدیل کرد، و در نقطه مصرف کاملاً تمیز است. افزون‌براین، برق‌رسانی با انرژی تجدیدپذیر کارآمدتر است و منجر به کاهش چشمگیری در انرژی موردنیاز می‌شود [۷۵].

۲-۵- سلول‌های سوختی (fuel cell) به‌منظور تولید انرژی الکتریکی

۲-۵-۱- پیل سوختی

پیل سوختی دستگاهی است که از طریق یک واکنش شیمیایی برق تولید می‌کند. همه پیل‌های سوختی دو قطب الکتریکی (الکترود) به نام آند و کاتد دارند. در واقع، واکنش‌های شیمیایی در این الکترودها صورت می‌گیرد و منجر به تولید الکتریسیته می‌شود. علاوه‌براین، هر پیل سوختی الکترولیت و کاتالیست نیز دارد؛ نقش الکترولیت جابه‌جایی ذرات باردار بین الکترودها است، درحالی‌که کاتالیست سرعت واکنش‌ها را در الکترودها افزایش می‌دهد.

با اینکه هیدروژن سوخت اصلی ورودی پیل به‌شمار می‌آید، برای شکل گرفتن واکنش، به اکسیژن نیز نیاز است. یکی از بزرگ‌ترین جذابیت‌های پیل سوختی این است که الکتریسیته با کمترین میزان آلودگی تولید می‌شود. در واقع، بیشترین میزان از اکسیژن و هیدروژن ورودی به پیل، در نهایت به شکل یک محصول فرعی بی‌خطر، یعنی آب، ترکیب خارج می‌شود. عملاً، هر پیل سوختی مقدار خیلی کمی جریان مستقیم برق تولید می‌کند و به همین دلیل تعداد زیادی پیل در دسته‌های بزرگی که پشته یا استک (Stack) نامیده می‌شوند برای تولید برق مورداستفاده قرار می‌گیرند.

۲-۵-۲- تاریخچه پیل سوختی

با وجود اینکه پیل سوختی از فناوری‌های نوین به‌شمار می‌آید، اما بیش از ۱۵۰ سال موضوع آشنایی برای پژوهشگران بوده است. ویلیام رابرت گروو (William Robert Grove) در سال ۱۸۳۸ «پیل گروو» را ساخت که الکترودهای پلاتینی غوطه‌ور در

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سولفات روی داشت و ۱۲ آمپر جریان با ولتاژ ۱٫۰۳ ولت تولید می‌کرد. پیش از این نیز، ویلیام نیکلسون (William Nicholson) و آنتونی کارلیسل (Anthony Carlisle) فرایند استفاده از برق را برای جداسازی اکسیژن و هیدروژن شرح داده بودند، اما به گفته خود گروو، «ترکیب گازها برای تولید برق گامی بسیار دورتر از آنچه تا آن زمان پیموده بودند به نظر می‌رسید».

کریستین شوباین (Christian Schönbein)، دوست گروو، که مکاتبات وی را نیز انجام می‌داد، به همراه گروو، نظریه شیمیایی را موردبحث قرار دادند و پاگندروف نیز نظریه برخورد را موردبررسی قرار داد تا در نهایت بخش‌هایی از عملکرد و تئوری واکاوی شد. گروو با استفاده از نتایج این تحقیقات شاهکار خود را به اتمام رساند و اولین پیل سوختی را ساخت که «باتری گازی» نام گرفت [۷۶].

فردریش ولیهلم اوستوالد (Friedrich Wilhelm Ostwald) یکی از بنیانگذاران شیمی‌فیزیک، درک زیادی از نحوه عملکرد پیل‌های سوختی فراهم کرد. در سال ۱۸۹۳ او به‌صورت تجربی ارتباط اجزای مختلف پیل را تشریح کرد: الکترودها، الکترولیت، عوامل اکسیداسیون و کاهش، آنیون‌ها و کاتون‌ها. در واقع، اوستوالد در امتداد حرفه و تخصص خود که شرح ارتباط خواص فیزیکی و واکنش‌های شیمیایی بود، معمای باتری گازی گروو را حل کرد. توضیحات او در مورد اصول شیمی نهفته در پیل سوختی، زمینه را برای کار محققان بعدی روی پیل سوختی فراهم کرد.

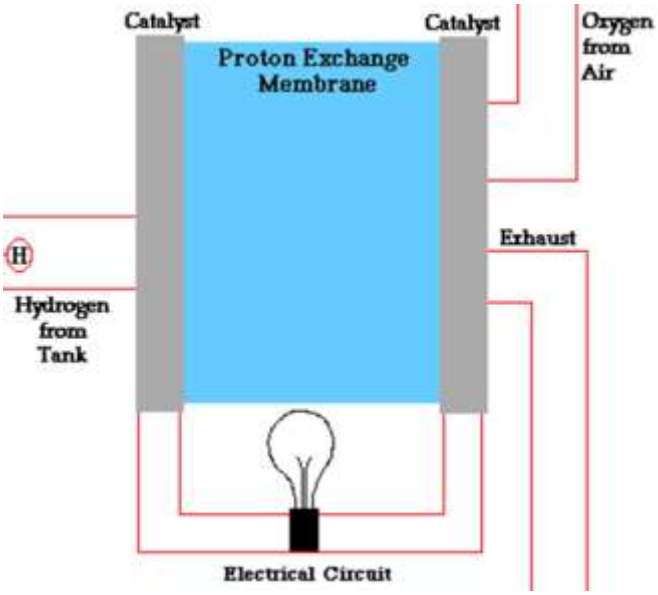
۲-۵-۳- سازو کار پیل سوختی

هدف از ساخت پیل سوختی تولید جریان برق به‌گونه‌ای است که با جریان خروجی از پیل، مثلاً بتوان یک موتور الکتریکی را راه‌اندازی و یا چراغی روشن کرد. به دلیل ماهیت عملکردی الکتریسیته، جریان تولیدی در پیل سوختی در نهایت به آن باز می‌گردد تا یک مدار را کامل کند. در واقع، این واکنش‌های شیمیایی هستند که جریان را تولید می‌کنند و اصل عملکرد پیل سوختی را شکل می‌دهند.

انواع مختلفی پیل سوختی وجود دارد که تا حدی متفاوت از یکدیگر عمل می‌کنند، اما به‌طورکلی، اتم‌های هیدروژن به آند پیل وارد و در آنجا در یک واکنش شیمیایی یونیزه شده و دارای بار مثبت می‌شوند. جریان الکترون‌های جداشده از هیدروژن، جریان داخل

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سیم را شکل می‌دهد. اگر جریان متناوب (AC) نیاز باشد، جریان مستقیم خروجی از پیل وارد دستگاه به نام اینورتر می‌شود تا به جریان متناوب مطلوب تبدیل گردد [۷۷].



شکل ۲-۱ شماتیک پیل سوختی [۷۷]

در پیل سوختی، اکسیژن به کاتد وارد شده و در بعضی انواع پیل سوختی در آنجا با الکترون‌هایی که از مدار برمی‌گردند و یون‌های هیدروژن که از طریق الکترولیت از آند عبور کرده‌اند، واکنش می‌دهد. در انواع دیگر، اکسیژن به همراه الکترون‌ها از الکترولیت گذشته و در آند با یون هیدروژن واکنش می‌دهد.

الکترولیت نقشی کلیدی در پیل سوختی ایفا می‌کند، زیرا باید به یون‌های مشخصی اجازه عبور بین کاتد و آند را بدهد. اگر الکترون‌های آزاد یا ذرات دیگر بتوانند از الکترولیت عبور کنند، واکنش شیمیایی را دچار اختلال خواهند کرد.

ترکیب هیدروژن و اکسیژن چه در آند اتفاق بیفتد و چه در کاتد، ماحصل آن آب خواهد بود که از پیل خارج می‌شود. می‌توان گفت تا وقتی که ورودی اکسیژن و هیدروژن پیل تأمین شود، برق نیز تولید خواهد شد.

مزیت دیگر پیل سوختی در مقایسه با دیگر منابع این است که پیل سوختی به‌صورت شیمیایی برق تولید می‌کند و نه با واکنش احتراق؛ بنابراین محدودیت‌های قوانین ترمودینامیکی مانند محدودیت کارنو را ندارد و در نتیجه، پیل سوختی در استخراج انرژی از یک سوخت، بهینه‌تر و کارآمدتر عمل می‌کند. علاوه‌براین، حرارت اتلافی پیل را نیز می‌توان کنترل و از آن برای افزایش کارایی سیستم استفاده کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

اما چرا نمی‌توان پیل سوختی را به راحتی تهیه کرد؟ با اینکه تشریح طرز کار پیل سوختی دشوار نیست، اما ساخت یک پیل سوختیِ کم‌هزینه، کارآمد و قابل اطمینان کار بسیار دشواری است.

محققان و مخترعان برای دستیابی به‌کارآمدی بیشتر، مدل‌های مختلفی از پیل را طراحی کرده‌اند که جزئیات فنی هر کدام متفاوت از دیگری است. در ساخت پیل، مسئله‌ای که بیشترین محدودیت را برای سازندگان ایجاد می‌کند، انتخاب الکترولیت است. برای مثال، طراحی الکترودها و انتخاب مواد سازنده آنها به الکترولیت بستگی دارد. امروزه انواع الکترولیت‌های متداول عبارت‌اند از: قلیایی، کربنات مذاب، اسید فسفریک، غشاء تبادل پروتون (PEM)) و اکسید جامد. سه نوع اول الکترولیت مایع دارند و دو مدل آخر، الکترولیت جامد.

نوع پیل سوختی به الکترولیت آن بستگی دارد. بعضی از پیل‌ها به هیدروژن خالص نیاز دارند، بنابراین به دستگاه‌ها یا قطعات اضافه‌ای نیز برای خالص کردن سوخت احتیاج خواهند داشت، مانند تبدیلگر[1] یا بهساز سوخت. انواع دیگر پیل، ناخالصی را می‌پذیرند، اما باید دمای کاری آنها بالاتر باشد تا کارآمدی خود را حفظ کنند.

همان‌طور که گفته شد پیل‌های سوختی را بر اساس نوع الکترولیتی که در آن به‌کار می‌رود، به پنج دسته طبقه‌بندی می‌کنند: ۱. پیل‌های سوختی قلیایی 2 (AFC)، پیل‌های سوختی کربنات مذاب 3 (MCFC)، پیل‌های سوختی اسید فسفریک 4 (PAFC)، پیل‌های سوختی اکسید جامد 5 (SOFC)، پیل‌های سوختی غشاء مبادله‌کننده پروتون 6 (PEMFC)، پیل سوختی متانولی (DMFC). هر گونه‌ای از پیل سوختی مزایا و معایبی دارد، اما هنوز هیچ‌کدام به اندازه‌ای به‌صرفه نیست تا جایگزین مدل‌های سنتی تأمین انرژی مانند نیروگاه‌های هسته‌ای یا فسیلی شود.

۲-۶- انواع مختلف پیل‌های سوختی

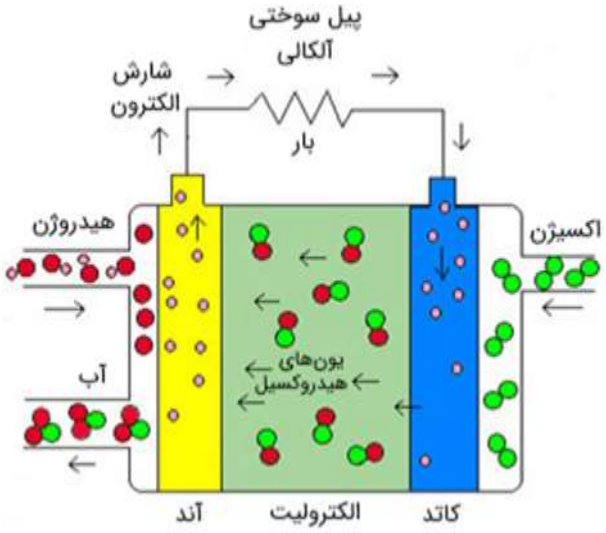
۲-۶-۱- پیل سوختی قلیایی

در پیل سوختی قلیایی از اکسیژن و هیدروژن متراکم برای سوخت و از هیدروکسید پتاسیم (KOH) در آب به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. بازده آن تقریباً ۷۰ درصد و دمای کاری‌اش ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، توان خروجی این نوع پیل

1 Reformer

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سوختی در بازه ۳۰۰ وات تا ۵ کیلووات است. از این نوع پیل در فضاپیمای آپولو برای تأمین برق و آب آشامیدنی همزمان با آن استفاده شد. این نوع از پیل به هیدروژن خالص نیاز دارد، الکترودهای آن از جنس پلاتین و گران‌قیمت هستند و مانند هر مخزن سیال دیگری امکان نشتی دارد [۷۸].

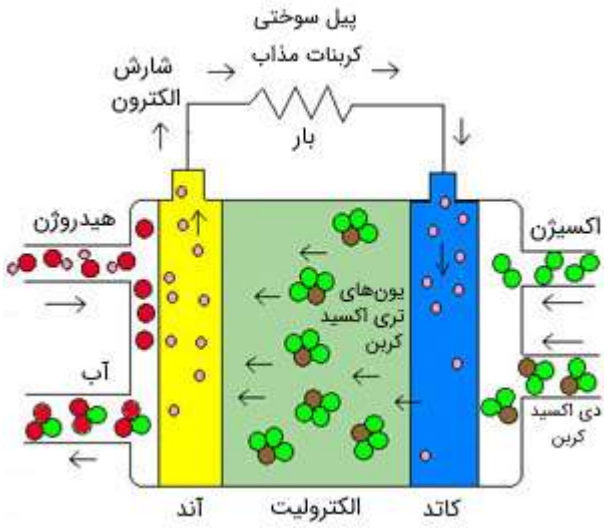


شکل ۲-۲ پیل سوختی قلیایی [۷۸]

۲-۶-۲- پیل سوختی کربنات مذاب

پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) از ترکیبات نمک مانند سدیم یا منیزیم در دمای بالا به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. بازده آن از ۶۰ تا ۸۰ درصد متغیر است و دمای کاری آن در حدود ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد است. تاکنون واحدهایی از این نوع با ظرفیت بیش از ۲ مگاوات ساخته شده‌اند و طراحی واحدهایی با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات نیز موجود است. دمای بالای کاری در این پیل‌ها، آسیب ناشی از مونوکسید کربن را محدود می‌کند و همچنین گرمای اتلافی می‌تواند برای تولید برق بیشتر بازیابی شود. الکترود-کاتالیست‌های این نوع پیل سوختی که از جنس نیکل است، به نسبت الکترودهای پلاتینی نوع قبلی، قیمت بالایی ندارد؛ اما دمای کاری بالا، انتخاب مواد الکترود و کاربردهای ایمن آن را محدود می‌کند (به‌طور مثال، این دمای کاری برای استفاده‌های خانگی بسیار بالا و غیر ایمن است) [۷۹].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۲-۳ پیل سوختی کربنات مذاب [۷۹]

۲-۶-۳- پیل سوختی اسید فسفوریک

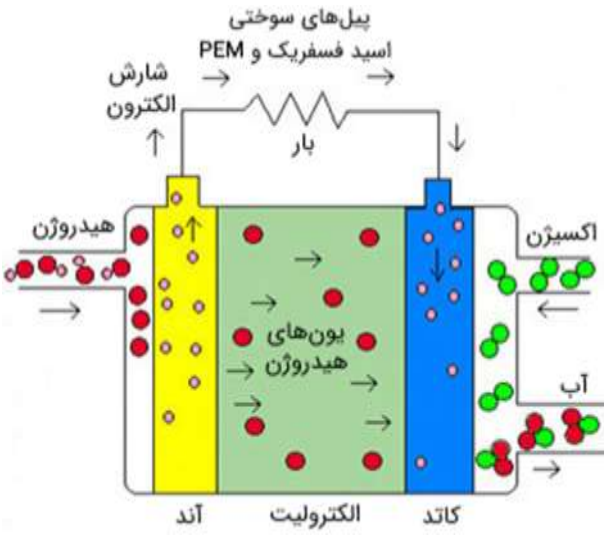
پیل سوختی اسید فسفوریک (PAFC) نیز به طریق مشابه از اسید فسفریک به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌کند. بازدهی این نوع پیل در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد بوده و دمای کاری آن بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است. توان پیل‌های سوختی موجود از این نوع تا ۲۰۰ کیلووات است، اما توان واحدهایی تا ۱۱ مگاوات نیز آزمایش شده است. پیل‌های سوختی اسید فسفوریک غلظت کربن مونوکسید را تا ۱،۵ درصد می‌پذیرند که این باعث می‌شود گستره انتخاب سوخت برای آن گسترده‌تر باشد. بااین‌حال، اگر گازوئیل به‌عنوان سوخت مورداستفاده قرار گیرد، باید سولفور آن زدوده شود. این نوع پیل به الکترود-کاتالیست پلاتینی نیاز دارد و علاوه‌برآن، قطعات داخلی نیز باید نسبت به محیط اسیدی خورنده مقاوم باشند [۸۰].

۲-۶-۴- پیل سوختی با غشاء تبادل پروتون

پیل سوختی با غشاء تبادل پروتون (PEM) با الکترولیت پلیمری کار می‌کند که در قالب یک صفحه نازک و نفوذپذیر درآمده است. بازده آن ۴۰ تا ۵۰ درصد، دمای کاری‌اش حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد و توان خروجی آن معمولاً بین ۵۰ تا ۲۵۰ کیلووات است. الکترولیت جامد و انعطاف‌پذیر این سلول‌ها نشتی ندارند و ترک نمی‌خورد. گرچه دمای پایین کاری، پیل‌های PEM را برای

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

کاربردهای خانگی و درون خودرو مناسب کرده است، اما سوخت آنها باید تصفیه و خالص شود و دو الکترود پلاتینی در هر دو طرف غشاء قرار گیرد که خود، هزینه ساخت آن را افزایش می‌دهد [۸۱].

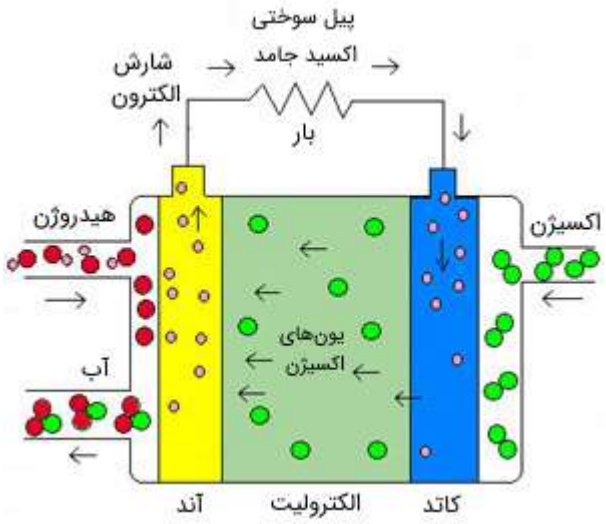


شکل ۲-۴ پیل سوختی اسید فسفریک و PEM [۸۰،۸۱]

۲-۶-۵- پیل‌های اکسید جامد

پیل‌های اکسید جامد (SOFC) از نوعی اکسید فلز به‌عنوان الکترولیت بهره می‌برند که ترکیبی سرامیکی و سخت است. بازده این پیل‌ها در حدود ۶۰ درصد و دمای کاری آنها تقریباً ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است که این دمای بالا کاربری آنها را محدود می‌کند. خروجی این پیل‌ها تا ۱۰۰ کیلووات گزارش شده است. در چنین دمای بالایی به تبدیلگر یا بهساز برای جداسازی هیدروژن نیازی نیست و گرمای اتلافی نیز می‌تواند برای تولید برق بیشتر، بازیابی و استفاده شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۲-۵ پیل سوختی اکسید جامد [۸۲]

یکی دیگر از انواع پیل سوختی، نوع میکروبی آن است. این نوع پیل یک مخزن ذخیره باکتری دارد که با تجزیه قند یا سایر مواد ارگانیک و حتی فاضلاب توسط باکتری‌ها برق تولید می‌کند. نکته مهم در این نوع پیل، تأمین مواد ارگانیک به روشی قابل‌اطمینان است، زیرا در صورت عدم رسیدن به موقع غذا، باکتری‌ها از بین می‌روند [۸۲].

۲-۷- واکنش‌ها در پیل سوختی

برای درک بهتر عملکرد پیل سوختی بهتر است با واکنش‌های اساسی و برخی اصطلاحات در شیمی آشنا شویم. در یک پیل سوختی، واکنش احتراق هیدروژن در واقع به دو نیم‌واکنش الکتروشیمیایی تقسیم می‌شود:

$$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$$

$$1/2\ O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O$$

در معادله اول، چون الکترون‌ها توسط واکنش آزاد می‌شوند، اکسایش رخ داده است و در معادله دوم چون الکترون‌ها در معادله مصرف می‌شوند، کاهش رخ داده است. همچنین، آند به الکترودی گفته می‌شود که در آن اکسایش اتفاق بیفتد یا در حالت کلی‌تر الکترون از آن خارج شود. کاتد نیز به الکترودی گفته می‌شود که واکنش کاهش در آن رخ دهد و در واقع الکترون به آن وارد شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۸- طراحی و محاسبات کلی پیل سوختی

به‌طور خلاصه، در طراحی پیل سوختی با استفاده از اصول ترمودینامیکی، قوانین نرست، گیبس و... چگالی جریان و تعداد الکترون‌های لازم محاسبه شده و سپس با در نظر گرفتن قیود ازپیش تعیین‌شده، به‌طور مثال در انتخاب نوع الکترولیت، محاسبات مربوط به اندازه، دما و... قابل‌انجام است. در ادامه به برخی روابط کلی مربوط به محاسبات طراحی پیل سوختی اشاره می‌شود.

۲-۸-۱- ولتاژ

معادله نرنست [1] که نقش مهمی در محاسبات مربوط به پیل سوختی ایفا می‌کند، در حالت کلی به شکل زیر است:

$$\mathrm{E} = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod a_{products}^{v_i}}{\prod_{\mathrm{reactants}}^{v_i}}$$

که در آن، E ولتاژ بازگشت‌پذیر، F ثابت فارادی، Tدما، R ثابت گازها، n تعداد الکترون‌ها و a ضریب فعالیت اجزا است.

۲-۹- بازده پیل سوختی

بازده واقعی پیل سوختی همواره باید کمتر از بازده ترمودینامیکی آن باشد. دو دلیل اصلی برای این مسئله، افت ولتاژ و اتلاف مربوط به سوخت است. بازده واقعی پیل به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{\mathrm{real}} = \varepsilon_{\mathrm{thermo}} \times \varepsilon_{\mathrm{voltage}} \times \varepsilon_{\mathrm{fuel}}$$

بازده ترمودینامیکی پیل، یعنی $\varepsilon_{\mathrm{thermo}}$ در واقع نشان می‌دهد که حتی در شرایط ایدئال چه میزان از آنتالپی موجود در سوخت می‌تواند به‌کار تبدیل شود. بازده ولتاژ $\varepsilon_{\mathrm{voltage}}$ اتلاف مربوط به اثرات بازگشت‌ناپذیری انرژی جنبشی را نشان می‌دهد. این اتلاف‌ها در نمودار جریان–ولتاژ پیل قابل‌مشاهده و از طریق رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$\varepsilon_{voltage} = \frac{V}{E}$$

1 Nernst equation

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

که در آن، V ولتاژ کاری پیل و E ولتاژ بازگشت‌پذیر ترمودینامیکی آن است.

همچنین بازده سوخت بیان می‌کند که همه سوخت واردشده به پیل در واکنش الکتروشیمیایی شرکت نمی‌کند و مقداری از آن ممکن است در واکنش‌های حاشیه‌ای وارد شود. این بازده از طریق رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$\varepsilon_{\text{fuel}} = \frac{i/nF}{v_{\text{fuel}}}$$

۲-۹-۱- جریان

باید توجه داشت که در محاسبات پیل سوختی، چگالی جریان اهمیت بیشتری نسبت به خود جریان دارد. اغلب نمودارهای مربوط به عملکرد پیل نیز بر مبنای چگالی جریان رسم می‌شوند. چگالی جریان را غالباً با j نشان داده و از رابطه زیر محاسبه می‌کنند:

$$j = \frac{i}{A}$$

که در آن، i نشان‌دهنده جریان و A سطح مقطع است. واحد چگالی جریان آمپر بر سانتی‌متر مربع (A/cm^2) است، اما می‌توان برحسب مول بر سانتی‌متر مربع (mol/cm^2) نیز آن را نشان داد.

۲-۱۰- مزایای استفاده از پیل‌های سوختی

- مزایای پیل‌های سوختی به‌طورکلی عبارت‌اند از: پیل سوختی آلودگی ناشی از سوزاندان سوخت‌های فسیلی را حذف کرده و تنها محصول جانبی آن آب است.
- درصورتی‌که هیدروژن مصرفی حاصل از الکترولیز آب باشد، نشر گازهای گلخانه‌ای به صفر می‌رسد.
- به دلیل وابسته نبودن به سوخت‌های فسیلی متداول نظیر بنزین و نفت، وابستگی اقتصادی کشورهای ناپایدار اقتصادی را حذف می‌کند.
- از سوخت‌های تجدیدپذیر استفاده شده و عامل گرمایش زمین را حذف می‌کند.
- با نصب پیل‌های سوختی نیروگاهی کوچک، شبکه غیرمتمرکز نیرو گسترده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- پیل‌های سوختی راندمان بالاتری نسبت به سوخت‌های فسیلی متداول مانند نفت و بنزین دارد.
- هیدروژن در هر مکانی از آب و برق تولید می‌شود؛ بنابراین پتانسیل تولید سوخت، غیرمتمرکز خواهد شد.
- اکثر پیل‌های سوختی در مقایسه با موتورهای متداول بسیار بی‌صدا هستند.
- انتقال گرما از پیل‌های دما پایین بسیار کم است؛ بنابراین آنها برای کاربردهای نظامی مناسب خواهند شد.
- زمان عملکرد آنها از باتری‌های متداول بسیار طولانی‌تر است. فقط با دو برابر نمودن سوخت مصرفی می‌توان زمان عملکرد را دو برابر کرد و نیازی به دو برابر کردن خود پیل نیست.
- سوخت‌گیری مجدد پیل‌های سوختی به راحتی امکان‌پذیر است و هیچ‌گونه اثرات حافظه‌ای بر جای نمی‌گذارد.
- به‌علت عدم وجود اجزای متحرک، نگهداری از آنها بسیار ساده و آسان است.
- نصب و بهره‌برداری از پیل‌های سوختی بسیار ساده و مقرون‌به‌صرفه است.
- پیل‌های سوختی ماژولار هستند یعنی به راحتی توان تولیدی از آنها قابل‌افزایش است.
- این مولدها قابلیت تولید هم‌زمان برق و حرارت را دارند.
- امکان استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی پاک در آنها وجود دارد.
- به میکروتوربین‌ها متصل می‌گردند.
- پیل سوختی به تغییر بار الکتریکی پاسخ می‌دهد.
- پیل سوختی امکان تولید برق مستقیم با کیفیت بالا را دارد.
- چگالی نیروی بالایی دارد.
- میزان بازدهی آنها نسبت به سلول‌های دیگر بیشتر است.

۲-۱۱- معایب استفاده از پیل‌های سوختی

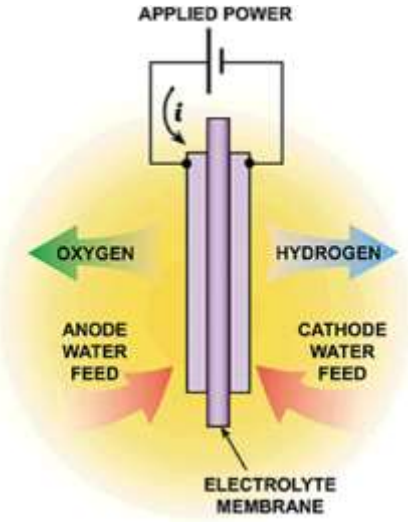
- به مواد بیشتر و فرایندهای سریع‌تری نسبت به دیگر پیل‌ها نیاز دارد.
- ممکن است در مدت طولانی کار، گرما مشکلاتی چون ناسازگاری عناصر و افت انرژی را موجب شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- در صورت استفاده از سوخت ناخالص، کار و گرمای بیش از حد موجب رسوب کربن و در نهایت مسمومیت پیل می‌شود [۸۳].

۲-۱۲- تولید هیدروژن بر پایه الکترولیز آب در دمای پایین

اصول الکترولیز آب اولین بار توسط Michael Faraday در سال۱۸۲۰ میلادی ارائه شد و فرایندی است که طی آن هیدروژن و اکسیژن از آب تولید می‌شود. لغت lysis به معنی حل شدن و یا از هم جدا شدن است؛ همچنین لغت الکترولیز در حقیقت به معنای شکستن و جدا کردن (در اینجا آب) با استفاده از جریان برق است. الکترولیز آب فرایند بسیار ساده‌ای است که طی آن جریان برق را از میان محلولی که شامل آب و الکترودها هستند، می‌گذرانند. مطابق شکل زیر طرز کار دستگاه الکترولیز به این صورت است که قطب منفی باتری به کاتد (الکترود منفی) و قطب مثبت باتری به آند (الکترود مثبت) متصل می‌شود. در الکترود آند تمایل به جذب الکترون‌ها وجود دارد. آب دارای هدایت الکتریکی پایینی برای عبور جریان الکتریکی است به همین دلیل برای افزایش هدایت الکتریکی در فرایند الکترولیز به آن الکترولیت اضافه می‌کنند.



شکل ۲-۶ نمای کلی الکترولیز آب و تولید هیدروژن [۸۴]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

مولکول‌های آب در اطراف الکترود کاتد به یون‌های$OH-$ و $H+$ تفکیک می‌شود و مقدار مولکول‌های آب در اطراف کاتد کاهش می‌یابد و غلظتOH بالا می‌رود. انتظار می‌رود که مولکول آب به یک یون$H+$ و یک یون$OH-$ تفکیک شود اما این اتفاق رخ نمی‌دهد برای اینکه اتم اکسیژن دارای الکترونگاتیوی بیشتری نسبت به اتم هیدروژن است.

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$$

بنابراین این مسئله باعث می‌شود که سطح بیرونی کاتد کاملاً توسط یون‌های هیدروکسید پوشیده شود اما یون$H+$ فاقد پروتون است و تلاش زیادی کرده تا یک الکترون گرفته و به‌صورت یک اتم هیدروژن درمی‌آید:

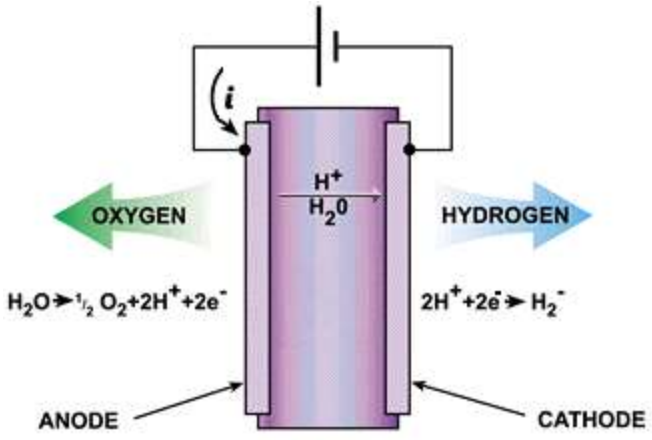
$$H^+ + e^- \rightarrow H$$

این اتم هیدروژن با اتم هیدروژن دیگری برخورد کرده و تشکیل یک مولکول گاز هیدروژن را می‌دهد و این مولکول گاز هیدروژن به‌صورت حباب‌هایی از سطح آب خارج می‌شود:

$$H+H \rightarrow H_2$$

در عین حال یون‌های هیدروکسید (OH^-) به سمت آند مهاجرت کرده و به سطح آند می‌رسند. آند الکترون‌های اضافی را که یون‌های هیدروکسید از هیدروژن گرفته بود، پس می‌گیرد و یون هیدروکسید مجدداً با سه مولکول هیدروکسید دیگر تشکیل یک مولکول گاز اکسیژن و دو مولکول آب می‌دهد. مولکول اکسیژن پایدار بوده و به‌صورت حباب‌هایی به سطح آب می‌آید.

$$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e$$



شکل ۲-۷ فرایندهای شیمیایی حین اتفاق افتادن الکترولیز [۸۴]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

این روزها وسایل زیادی بر اساس ایده «اقتصاد هیدروژنی» ساخته می‌شوند؛ در ایده اقتصاد هیدروژنی، سوخت فشرده هیدروژن به یک منبع انرژی مانند بنزین تبدیل می‌شود و خودروهای پیل سوختی که برای تولید برق از هیدروژن استفاده می‌کنند در کنار خودروهای برقی و موتورهای احتراقی قرار می‌گیرند. روش «سبز» (سازگار با محیط زیست) تولید هیدروژن، تجزیه آن از آب با استفاده از الکترولیز است. اما مشکل اینجاست که تجزیه آب گران‌قیمت و ناکارآمد است و رقابت هیدروژن سبز را در برابر هیدروژن قهوه‌ای و یا استفاده از بنزین در خودرو دشوار می‌سازد.

امروزه در روش‌های نوین موفق شده‌اند پلاتین گران‌قیمت بر روی کاتالیزور کربن را با استفاده از «کاتالیزور نانوذرات Janus با رابط اکسید نیکل– آهن» جایگزین کنند؛ مدار حاصل می‌تواند آب را با راندمان انرژی ۸۳,۷ درصد تجزیه کند. آنها در این روش برای تجزیه هیدروژن از آب به جای کاتالیست‌های گرانول، روتین، پلاتین و ایریدیم که تولیدکنندگان بزرگ هیدروژن از آنها استفاده می‌کنند و بسیار گران‌قیمت هستند از کاتالیزور آهن و نیکل استفاده می‌کنند. استفاده ازاین‌روش باعث افزایش چشمگیری در راندامان تولید هیدروژن و همچنین کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

انواع پیل‌سوختی و خصوصیات هر یک در جدول زیر مشخص است [۸۴].

جدول ۲-۱ انواع پیل‌سوختی و خصوصیات آنها

	پیل سوختی قلیایی	پیل سوختی متانولی	پیل سوختی کربنات مذاب	پیل سوختی اسید فسفریک	پیل سوختی پلیمری	پیل سوختی اکسیدجامد
الکترولیت	هیدروکسید پتاسیم	غشاء پلیمری	مایع کربنات مذاب ثابت	مایع اسید فسفریک ثابت	غشاء تعویض یونی	سرامیک
دمای عملیاتی	۶۰–۹۰	۶۰–۱۳۰	۶۵۰	۲۰۰	۸۰	۱۰۰۰
بازده	٪۴۰–۶۰	٪۴۰	٪۴۵–۶۰	٪۳۵–۴۰	٪۴۰–۶۰	٪۵۰–۶۵
توان	تا ۲۰ کیلووات	کمتر از ۱۰	بیش از یک	بیش از ۵۰	تا ۲۵۰ کیلووات	بیش از ۲۰۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

تولیدی		کیلووات	مگاوات	کیلووات		کیلووات
کاربرد	زیر دریایی و فضایی	کاربردهای قابل‌حمل	نیروگاهی	نیروگاهی	وسایل نقلیه، نیروگاهی کوچک	نیروگاهی

۲-۱۳- روش تولید هیدورژن بر پایه اصلاح گاز طبیعی

در مواردی که استفاده از گاز طبیعی اقتصادی نباشد یا نفت سنگین به قیمت‌ارزان در دسترس باشد از اکسیداسیون جزئی برای تولید هیدروژن استفاده می‌شود. باقیمانده‌های حاصل از فرایندهای شیمیایی ترجیحاً برای تولید هیدروژن و مونوکسیدکربن استفاده می‌شود. واکنش‌های اکسیداسیون جزیی شامل موارد زیر است:

$$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \leftrightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2 + Heat$$
$$C_nH_m + nH_2O + Heat \leftrightarrow nCO + (n + \frac{m}{2})H_2$$
$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + Heat$$

اکسیداسیون جزیی یک واکنش گرمازا بوده و در دمای بالا (بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) بدون وجود کاتالیست انجام می‌گیرد. مزیت استفاده از این روش بر فرایندهای کاتالیستی این است که دیگر نیازی به پاکسازی موادی همچون مشتقات گوگرددار نیست. هر چند گوگرد باید در مراحل بعدی زودوده شود. دمای بالا در اکسیداسیون جزیی استفاده از برش‌های نفتی سنگین‌تر که در فرایندهای کاتالیستی قابل‌مصرف و تبدیل به هیدروژن نبوده‌اند را در این فرایند امکان‌پذیر می‌سازد. دمای بالای عملیاتی، کاربرد این فرایند را در مقیاس‌های کوچک با مشکلات متعددی مواجه ساخته است. استفاده از کاتالیست‌ها سبب می‌شود تا دمای فرایند کاهش یابد که در این صورت به آن فرایند اکسیداسیون جزیی کاتالیستی گفته می‌شود.

کاتالیست‌های مورداستفاده در CPO بر پایه پلاتین و نیکل هستند. در فرایند تبدیل اکسید اسیون جزئی نسبت به فرایند تبدیل با بخار آب، میزان هیدروژن کمتری به ازای هر مولکول متان تولید می‌شود که این به معنی پایین بودن راندمان اکسیداسیون جزئی (کاتالیستی یا بدون استفاده از کاتالیست) نسبت به فرایند تبدیل با بخار آب است؛ همچنین به دلیل گرمازا بودن واکنش تبدیل در این فرایند، حرارت تولیدشده در پیل نمی‌تواند مورداستفاده قرار گیرد و ازاین‌رو راندمان پیل کمی پایین است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

برای تهیه خوارک پیل‌های سوختی مبدل اکسیداسیون جزئی مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این مبدل با تغییر نسبت هوا به سوخت، حرارت واکنش و در نتیجه حرارت راکتور کنترل می‌شود؛ ازاین‌رو هیچ مبدل حرارتی دیگری نیاز نیست [۸۵].

۲-۱۴- روش‌های میکروبی الکتروشیمیایی برای تولید هیدروژن و گاز سنتز

در پایان قرن اخیر، ایده استفاده از پیل‌های میکروبی در تلاش برای تولید الکتریسیته ارائه شد. به گونه‌ای که M.C. Potter پروفسور گیاه‌شناسی در دانشگاه Durham، اولین کسی بود که در سال ۱۹۱۱ کار بر روی آن را آغاز کرد. Potter قصد تولید الکتریسیته از E. coli را داشت. در سال ۱۹۳۱، Branet Cohen با ایجاد تعدادی پیل‌سوختی میکروبی نیمه که به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده بودند و ظرفیت تولید بیش از ۳۵ ولت تنها با ۲ میلی‌آمپر جریان را داشتند، کار وی را ادامه داد. فعالیت بیشتر در این زمینه توسط DelDuca و همکاران صورت گرفت. آنها از هیدروژن تولیدشده توسط تخمیر گلوکز با Clostridium butyricum که به‌عنوان ماده واکنش‌دهنده در آند پیل‌سوختی هوایی و هیدروژن قرار داشت، استفاده کردند. متأسفانه با وجود آن‌که پیل کار کرد، به دلیل طبیعت ناپایدار تولید هیدروژن از طریق میکروارگانیسم‌ها غیرقابل اطمینان بود. اگرچه این مسئله در ادامه توسط سوزوکی و همکاران در سال ۱۹۷۶ حل شد.

حتی با گذشت زمان از کار سوزوکی جزئیات کمی از چگونگی عملکرد پیل‌سوختی میکروبی به‌دست آمد تا اینکه بررسی بیشتر توسط MJ Allen و در ادامه توسط H. Peter Benetto هر دو از King College لندن، صورت گرفت. Bennetto پیل‌سوختی را به‌عنوان یک روش برای تولید الکتریسیته برای کشورهای جهان سوم مدنظر قرار داد. او کار خود را در اوایل دهه ۱۹۸۰ شروع و به فهم چگونگی عملکرد پیل‌های‌سوختی کمک شایانی کرد.

هم‌اکنون یافته‌ها حاکی از آن است که الکتریسیته می‌تواند مستقیماً از تجزیه مواد آلی در یک پیل‌سوختی میکروبی تولید شود، اگرچه مکانیسم دقیق فرایند هنوز باید به درستی مشخص شود. همانند یک پیل‌سوختی معمولی، یک پیل‌سوختی میکروبی (MFC[1]) نیز دارای محفظه کاتدی و آندی دقیق فرایند است، به‌گونه‌ای که محفظه آندی غیر هوازی از درون به محفظه کاتدی توسط یک غشاء تبادل یونی متصل شده است و مدار به کمک یک سیم خارجی کامل می‌شود.

1 Microbial Fuel cell

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

در ماه می سال ۲۰۰۷، دانشگاه Queen Sland در استرالیا، نمونه آزمایشی MFC خود را به‌صورت یک پروژه مشترک با شرکت Fosters Brewing، تکمیل کرد. این نمونه آزمایشی، با حجم ۱۰ لیتر، فاضلاب کارخانه تخمیر را به دی‌اکسیدکربن، آب تمیز و الکتریسیته تبدیل می‌نمود. با انجام موفقیت‌آمیز این نمونه آزمایشی، طرح‌هایی برای تولید پیاپی ۶۶۰ گالنی ریخته شد تا میزان تقریبی ۲ کیلووات انرژی را تأمین کند. اگرچه مقدار انرژی تولیدی قابل‌چشم‌پوشی است، تولید آب تمیز برای استرالیا از درجه اهمیت بالاتری برخوردار بود [۸۵].

۲-۱۵- ساختار پیل سوختی بر اساس سوخت متانول و سایر گازهای سنتزی

در دهه‌های اخیر مهم‌ترین پیشرفت در بین انواع پیل‌های سوختی، روی پیل سوختی پلیمری صورت گرفته است. تکنولوژی موجود، به دلیل هزینه‌های بالای تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن قیمت بالایی دارد. برای تجاری‌سازی این پیل‌های سوختی باید شامل سیستم روشن- خاموش شدن سریع، چگالی انرژی بالا، راندمان بالای سوخت و ذخیره ایمن و ارزان سوخت باشد. به دلایل فوق، پیل‌های سوختی متانولی مستقیم رشد یافته‌اند. الکترولیت به‌کاررفته در این نوع پیل، مانند پیل سوختی پلیمری، غشایی از جنس پلیمر بیشتر پرفلوروسولفونیک اسید است. الکترودها با پایه کربنی ساخته می‌شوند که در لایه کاتالیستی کاتد از پلاتین استفاده می‌شود. سوخت محلول متانول وارد محفظه آند شده و پس از نفوذ از لایه گازی، در سطح کاتالیست واکنش داده و طبق معامله یون هیدروژن و الکترون به همراه دی‌اکسید کربن تولید می‌شود. پیل‌سوختی متانولی یک فناوری نوظهور است که در آینده بسیار نزدیک در تلفن‌های همراه و لپ‌تاپ‌ها به تولید انبوه خواهد رسید. در اویل دهه ۹۰ پیل‌سوختی متانولی به دلیل کارایی و چگالی قدرت پایین و سایر مشکلاتش هنوز مناسب نبود. بهبود در کاتالیست و دیگر پیشرفت‌های ایجادشده در طی سال‌های اخیر، چگالی قدرت را ۲۰ برابر افزایش داده و کارایی آن را به ۴۰ ٪ رسانیده است. میزان توان گرفته‌شده از این پیل‌سوختی در حدود 200-400 mW/Cm^2 است.

پیل‌سوختی متانولی در واقع نوعی پیل‌سوختی پلیمری است با این تفاوت که در این پیل‌سوختی ساختار الکترودها با پیل‌سوختی پلیمری تا حدی تفاوت دارد و در این نوع پیل، متانول مایع به‌عنوان سوخت مصرف می‌شود. مشکل اصلی در مورد این پیل‌سوختی عبور متانول از غشاء پلیمری است. به همین دلیل تحقیقات بر روی الکترولیت‌هایی که میزان عبوردهی کمتری دارند متمرکز شده است. در پیل‌سوختی متانولی یون هیدروژن (پروتون) حامل بار است. در آند متانول مایع با آب اکسید شده و دی‌اکسید کربن و یون

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

هیدروژن تولید می‌کند. یون‌های هیدروژن از طریق الکترولیت و الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی که عامل ایجاد الکتریسته در سیستم است، به سمت کاتد حرکت می‌کنند. در کاتد یون‌های هیدروژن و الکترون‌ها با اکسیژن واکنش داده و آب تولید می‌شود که مقداری از این آب تولیدشده برای مصرف به سمت آند ارسال می‌گردد. این پیل‌ها در محدوده دمایی ۵۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، آزمایش شده‌اند. دمای کم کارکرد و عدم نیاز به مبدل سوخت، این پیل را نمونه خوبی برای کاربردهای کوچک و متوسط مثل تلفن‌های همراه و دیگر محصولات همچون آن مانند مولد برق اتومبیل معرفی می‌کند. پیل‌های سوختی متانولی می‌تواند ۱۰ برابر باتری‌های پیشرفته انرژی الکتریکی در اختیار ما قرار دهند و نیاز به شارژ مجدد نخواهند داشت. فقط لازم است که کارتریج حاوی سوخت در این نوع پیل‌های سوختی تعویض شود. دمای پایین این پیل‌ها سبب می‌شود تا فرایند اکسیداسیون متانول به یون هیدروژن و دی‌اکسیدکربن نیاز به مقادیر بیشتری از کاتالیست و فعالیت بهتر آن داشته باشد و همین موضوع موجب گران‌تر شدن این پیل‌ها می‌شود. با توجه به اینکه متانول سمی است برخی شرکت‌ها به توسعه پیل‌های سوختی اتانولی نیز پرداخته‌اند. البته عملکرد پیل‌سوختی اتانولی نصف نوع متانولی است که انتظار می‌رود با ادامه تحقیقات کارایی آنها به هم نزیک شود [۸۶].

۲-۱۶- نسل جدید پیل‌های سوختی

مجموعه انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز سهم بیشتری در سیستم تأمین انرژی جهان به عهده می‌گیرد. افزون‌براین با سیستم‌ها و طراحی‌های جدید می‌توان تا حدود زیادی بر بحران زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی غلبه کرد. در این میان پیل‌های سوختی ابزارهایی هستند که با آلودگی بسیار ناچیز انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی و گرما تبدیل می‌کنند. از مهم‌ترین بخش‌های پیل‌های سوختی دو واکنش اصلی کاتدی و آندی است. بهبود این واکنش‌ها به عملکرد اصلی کاتالیست‌های این دو واکنش برمی‌گردد. فعالیت الکتروکاتالیستی بالا، دوام و پایداری کاتالیست، مقاومت در برابر خوردگی و مسمومیت کاتالیستی از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که بهبود در آنها سبب بهبود واکنش‌های کاتالیستی در راستای تولید توان بیشتر خواهد شد. واکنش احیای اکسیژن (ORR[1]) که همان نیم‌وانش کاتدی است به علت سینتیک بسیار کند آن نقش مهمی در عملکرد نهایی پیل سوختی ایفا می‌کند.

1 Oxygen Reduction Reaction

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

درحال‌حاضر، پیل‌های سوختی، شبیه به خودروها تولید می‌شوند؛ یعنی قطعات مختلف آنها به‌صورت جداگانه ساخته شده و سپس روی هم سوار می‌شوند تا یک پیل سوختی تولید شود. این روند تولید، مراحل بسیار زیادی دارد و در عین هزینه بالای آن، زمان بسیار زیادی صرف تولید آن می‌شود. گروه تحقیقاتی تامپسون با استفاده از فرایند پیشرفته میکروفابریکیشن، نسل جدید پیل‌های سوختی را تولید می‌کند. در این فرایند به جای تولید جداگانه پیل سوختی، به‌صورت لایه لایه ساخته می‌شوند، روشی که هم‌اکنون برای ساخت ابزارهای میکروالکترونیک مورداستفاده قرار می‌گیرد. پژوهشگران دانشگاه میشیگان امیدوارند با استفاده از این فناوری ارزان‌قیمت و همچنین استفاده از مواد ارزان‌تر، قیمت پیل‌های سوختی را از ۱۰ هزار دلار برای هر کیلو وات به ۱۰۰۰ دلار برسانند [۸۷].

۲-۱۷- معرفی پیل‌های سوختی دما بالا و پایین (HT[1] و LT[2])

پیل‌های سوختی بر اساس دمای عملکرد، دامنه‌ی دمایی از ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای (PEMFC) تا ۱۰۰۰ سانتی‌گراد برای (SOFC) دارند. پیل‌های سوختی دمای پایین (PEMFC، PAFC، AFC) دارای حامل‌های یونی H+ و یا OH- هستند که انتقال یون از میان الکترولیت و انتقال الکترون‌ها از طریق مدار خارجی را به عهده دارند و در پیل‌های سوختی دمای بالا مانند الکترولیت کربنات مذاب (MCFC) و الکترولیت اکسید جامد (SOFC)، جریان الکتریکی به ترتیب از طریق یون‌هایCO_3^{2-} و O^{2-} انتقال می‌یابد. در پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC) یا سرامیکی رسانش یون در الکترولیت معمولاً در دمای بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود.

به‌طورکلی پیل‌های سوختی پلیمری دمابالا (بالاتر از دمای۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) به دلیل مزایایی که نسبت به پیل‌های پلیمری دماپایین دارند، اخیراً موردتوجه قرار گرفته‌اند. از جمله این مزایا می‌توان به بهبود سینتیک واکنش، حذف سیستم‌های مرطوب‌سازی گازهای ورودی، کاهش پیچیدگی‌های مدیریت آب و سیستم خنک‌کننده، امکان استفاده از هیدروژن با درصد خلوص پایین و غیره اشاره کرد [۸۸].

1 High Temprature
2 Low Temprature

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۱۸- پیل‌های سوختی هوشمند و قابل‌حمل

حجم مبادلات پیل‌سوختی در بخش پیل‌های هوشمند و قابل‌حمل در سال ۲۰۱۲ مطابق با پیش‌بینی‌ها پیش نرفت و در حدود ۱۸۹۰۰ واحد مبادله شد. با این وجود حجم تبادلات نسبت به سال ۲۰۱۱، ٪۱۷۴ رشد یافت که این رشد بازتابی از پتانسیل موجود در این بخش است. شرکت‌های هوریزون و myFC به تلاش‌هایشان برای تجاری‌سازی سامانه‌های خود در سال ۲۰۱۳ ادامه دادند؛ اما شرکت Aquafairy، موضوع اصلی خود را به بخش تجهیزات الکترونیکی مصرفی در راستای توسعه پیل‌های سوختی برای استفاده از توان پشتیبانی اضطراری تغییر داد. البته هنوز جای امیدواری است که ابراز تمایل به پیل‌های سوختی قابل‌حمل در بخش تجهیزات الکترونیکی مصرفی در سال‌های آتی نیز ادامه یابد و حجم مبادلات واحدها در پایان هر سال، بیش از پیش باشد.

از نظر حجم مگاوات مبادله‌شده، رقم مربوط به پیل‌های سوختی قابل‌حمل در مقایسه با سایر کاربردها کوچک‌تر بوده که این به دلیل اندازه‌های کوچک واحدهای پیل سوختی است. اطلاعات نشان می‌دهد، مگاوات مبادله‌شده حدوداً نزدیک به ۱۰۰ کیلووات است که در پایان سال ۲۰۱۲ میزان مگاوات مبادله‌شده حدود ٪۲۵ یعنی مقدار ۰/۵ مگاوات بیشتر از سال ۲۰۱۱ است. طبق پیش‌بینی‌ها، سطح مبادلاتی موردنظر در سال ۲۰۱۳ کاهش یافته یعنی این رقم به ۰/۳ مگاوات کاهش می‌یابد.

به‌طورکلی استفاده از پیل‌های سوختی هوشمند و قابل‌حمل در بخش‌های مختلفی کاربرد دارند:

- اسباب‌بازی‌ها و پیل‌های سوختی آموزشی
- واحدهای توان کمکی
- تجهیزات الکترونیکی مصرفی
- نظامی و سایر کاربردها

کاربردهای فناوری پیل‌های سوختی قابل‌حمل فقط محدود به کاربردهایی نمی‌شود که فوراً به ذهن خطور می‌کند، به‌طور مثال شرکت CEKAtec AG نمونه‌ی خاصی را ارائه داده و از پیل‌های سوختی برای تأمین توان موردنیاز واگن برقی حاوی نوشیدنی استفاده کرده است. این واحد برای تأمین توان قهوه‌ساز برای سفرهای طولانی ریلی طراحی شده است. این سامانه اولین بار به‌طور آزمایشی در مسیر ریلی سوئیس –زوریخ مورداستفاده قرار گرفت. با جایگزین کردن باتری‌ها با پیل‌سوختی IHPoS این شرکت به همراه با منبع ذخیره فشار پایین هیدروژن زمان کار این وسیله به دو برابر افزایش یافت. توان موردنیاز برای تحویل حدود ۱۲۰ قهوه

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

اسپرسو تأمین گشت. همچنین این سامانه پیل‌سوختی به لحاظ اندازه، کوچک‌تر از سامانه‌های متداول بوده و وزن آن نصف آن سامانه‌ها است [۸۹].

۲-۱۹- روش AMTEC[1] به‌منظور تولید جریان الکتریکی

مکانیسم فلزات قلیایی با نام اختصاری (AMTEC) یک دستگاه الکتروشیمیایی برای تبدیل مستقیم گرما به توان الکتریکی است. این دستگاه از یک فلز قلیایی در گردش (سدیم یا پتاسیم) که از یک الکترولیت جامد در یک مدار بسته عبور می‌کند، برای تولید جریان الکتریسیته در یک جریان خارجی استفاده می‌کند. این روش راندمان بالایی دارد و به این دلیل که هیچ بخش متحرکی به جز سیال در حال کار ندارد، آن را کاندید کاربردهای فضاپیمایی می‌کند. روش کار این نوع مولدهای الکتریسیته بدین‌شکل است که سیال کار در یک چرخه ترمودینامیکی بسته بین منبع گرم و سرد حرارتی که در دماهای مختلف نگه داشته می‌شود، حرکت می‌کند و در مرحله چرخش بخار بین این دو منبع، کار موجود از انبساط ایزوترمال سیال هنگام عبور از الکترولیت به‌طور مستقیم به برق تبدیل می‌شود [۹۰].

۲-۲۰- نکات کلیدی روش تولید جریان الکتریکی بر پایه روش‌های غشایی

به‌طورکلی فرایندهای جداسازی مبتنی بر غشاء انواع مختلفی دارند؛ از جمله آنهای می‌توان به میکروفیلتراسیون، الترافیلتراسیون، اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون، الکترودیالیز، تبخیر غشایی و تقطیر غشایی اشاره کرد. بنابراین، از طریق خواص ویژه‌ای که غشاها دارند می‌توان به خوبی جریان الکتریسیته نیز تولید کرد. تولید انرژی الکتریسیته توسط روش‌های غشایی یک روش مطمئن تولید توان برای آینده به‌شمار می‌آید.

روش‌های مختلفی برای استفاده از غشاء به‌منظور تولید انرژی وجود دارد. اولین روش فشار اسمزی تأخیری است که یک روش برای استفاده از انرژی گرادیان شوری فشار اسمزی تأخیری است. در این روش آب دریا به اتاق فشار پمپاز می‌شود که در فشاری پایین‌تر از اختلاف بین فشارهای آب شور و آب شیرین قرار دارد، آب شیرین نیز از طریق یک غشا به درون اتاق فشار پمپاز می‌شود که هم حجم و هم فشار اتاق را افزایش می‌دهد. با تعدیل اختلافات فشار توربین می‌چرخد و انرژی جنبشی ایجاد می‌کند.

1 alkali metal thermo-electrochemical energy converters

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

دومین روش توسعه‌یافته و بررسی‌شده الکترو دیالیز معکوس یا دیالیز معکوس نام دارد که اساساً ساخت یک باتری نمکی است. این روش به‌وسیله‌ی Leitz و Weinstein شرح داده شد: «مجموعه‌ای از انیون جایگزین و غشاتبادل کاتیونی می‌تواند برای تولید برق از انرژری آزادشده از آب رودخانه‌ها و دریا مورداستفاد قرار گیرد».

سومین روش، روش خازنی Doriano Brogioli بوده که نسبتاً جدید است و تاکنون در مقیاس آزمایشگاهی موردبررسی واقع شده است. با این روش می‌توان انرژی میان آب شور و آب شیرین را به‌وسیله شارژچرخه‌ای الکترودها در تماس با آب شور و فرایند تخلیه در آب شیرین استخراج نمود. ازآنجاکه میزان انرژی الکتریکی موردنیاز در طول مرحله شارژ کمتر از میزان انرژی خارج‌شده در طول مرحله تخلیه است، هر چرخه‌ی کامل به‌طور مؤثری انرژی تولید می‌کند [۹۱].

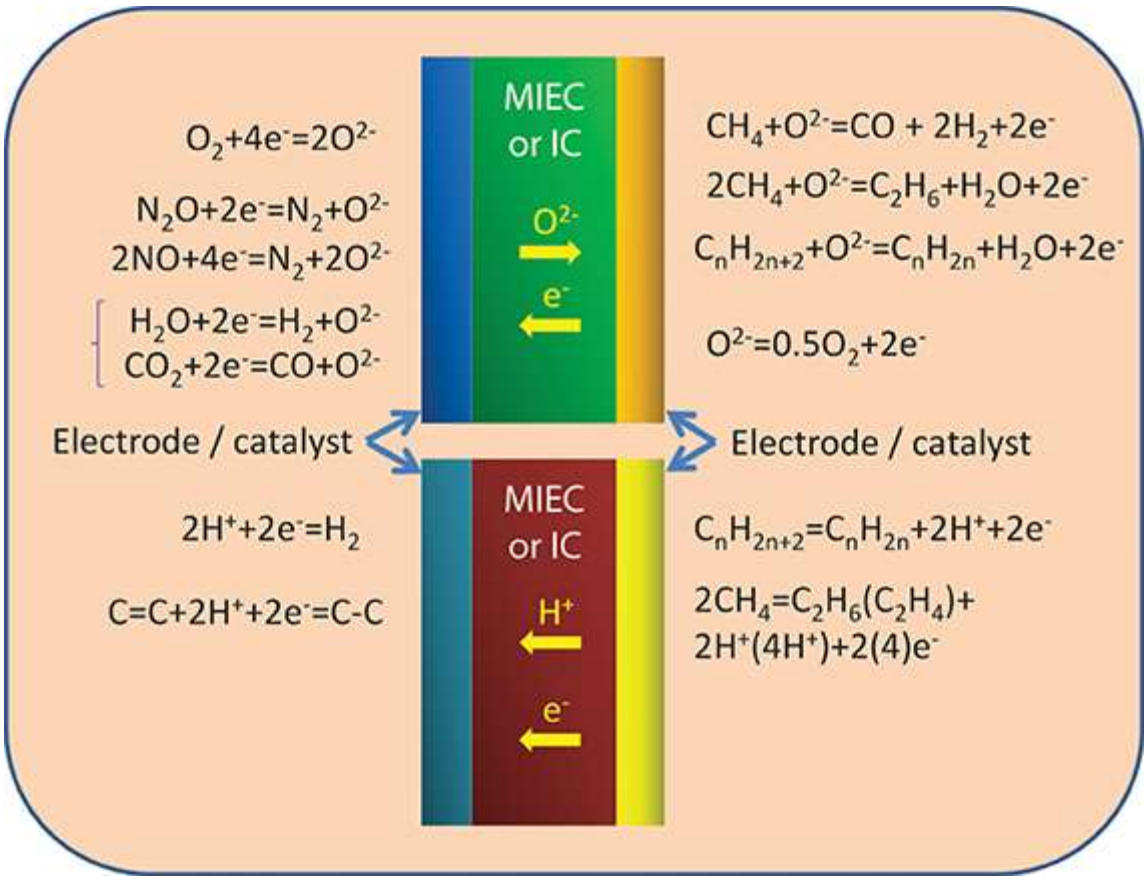
۲-۲۱- راکتورهای الکتروشیمیایی برای تولید و انبارش جریان الکتریکی

استفاده از راکتورهای الکتروشیمیایی از این واقعیت ناشی می‌شود که می‌توان در این نوع راکتورها انرژی را از شکلی به شکل دیگر به‌منظور ذخیره‌سازی و حمل و نقل آسان‌تر جت استفاده مجدد تبدیل کرد. برای مثال تولید محصولاتی مانند هیدروژن، آمونیاک یا گاز سنتز برای تولید سوخت مایع و استفاده در منابع انرژی تجدیدپذیر در راکتورهای الکتروشیمیایی قابل‌ارائه هستند. همچنین از فرایندهای الکتروشیمیایی نیز می‌توان برای تولید سوخت یا مواد شیمیایی با ارزش افزوده استفاده کرد. ازاین‌رو در حوزه راکتورهای الکتروشیمیایی چندین سیستم مختلف بر اساس الکترولیت‌های مایع و جامد ارائه شده است. مزیت عمده سیستم‌های الکترولیت جامد این است که هر دو واکنش‌دهنده و مواد شیمیایی محصول توسط غشای الکترولیت جدا شده و طیف وسیعی از شرایط عملیاتی متناسب با یک واکنش شیمیایی/الکتروشیمیایی خاص در دسترس است. بنابراین، سیستم درحال‌توسعه مبتنی بر الکترولیت‌های رسانای اکسیژن-یون یا پروتون هستند. انتخاب‌پذیری نسبت به واکنش اکسیداسیون/احیای جزئی را می‌توان با انتخاب مناسب الکترودهای کاتالیزوری یا مخلوط‌های کاتالیزور/الکترود با کنترل دقیق میزان عبور یون اکسیژن یا پروتون‌ها و شرایط عملکرد سلول کنترل کرد. ازاین‌رو، استفاده از راکتورهای الکتروشیمیایی به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی و یا تبدیل انرژی اهمیت ویژه‌ای دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۱-۱- عملکرد راکتور اکسیدان، هیدروژناسیون و دی‌هیدروژناسیون

در این راکتورها از یک O^{-2} یا H^{+} رسانا (IC) یا غشای مخلوط O^{-2}/e^{-} یا H^{+}/e^{-} (MIEC) برای جداسازی واکنش‌دهنده و محصولات استفاده می‌شود. این مواد به‌طور معمول دارای ساختارهای پروسکایت (ABO_3)، فلوریت (MO_2) یا پیروکلر ($A_2B_2O_7$) هستند. اغلب لایه الکترود/کاتالیزور در هر دو طرف غشای رسانای یون اعمال می‌شود، یون‌های $O-2$ یا H^{+} تحت یک میدان الکتریکی اعمال شده یا اختلاف فشار جزئی‌گونه عبور می‌کنند و واکنش‌دهنده را برای تولید سوخت یا مواد شیمیایی با ارزش افزوده کاهش می‌دهند.



شکل ۲-۸ عملکرد راکتور اکسیدان، هیدروژناسیون و دی‌هیدروژناسیون [۹۲]

از غشاهای سرامیکی متراکم مخلوط با O^{-2}/e برای تبدیل متان به گاز، اتصال اکسیداتیو متان به هیدروکربن‌های بالاتر، تبدیل اتیل بنزن به استایرن و دی‌هیدروژن زدایی اکسیداتیو آلکان‌ها به الفین‌ها و تبدیل آلاینده‌ها مانند N_2O و NO به N_2 با استخراج

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

اکسیژن استفاده شده است. به‌طور مشابه غشاهای رسانای پروتون می‌توانند برای واکنش هیدروژناسیون یا دهیدروژناسیون با افزودن یا حذف هیدروژن از ترکیبات آلی (CH_4 تا C_2H_4، C_2H_6 ؛ $C - C$ تا $C = C$ ؛ $C = C$ تا $C - C$) استفاده شوند.

برخی از چالش‌ها مانند در دسترس بودن مواد، مشکلات ساخت، طراحی و افزایش مقیاس برای انواع خاصی از راکتورهای الکتروشیمیایی وجود دارد. اغلب مواد در معرض شرایط اکسیداسیون یا کاهش شدید در دمای بالا قرار می‌گیرند. بنابراین، در این نوع از راکتورها پایداری دمایی اهمیت فراوانی دارد. همچنین محصولات نامطلوب طی اشتباهات احتمالی به راحتی مشکلاتی را به‌وجود می‌آورند. ازاین‌رو، این نوع راکتورها باید از نقطه‌نظر دما، شرایط عملیاتی، مواد اولیه و غیره بهینه شده و سپس مورداستفاده قرار گیرند [۹۲].

۲-۲۲- پیل‌های سوختی میکروبی

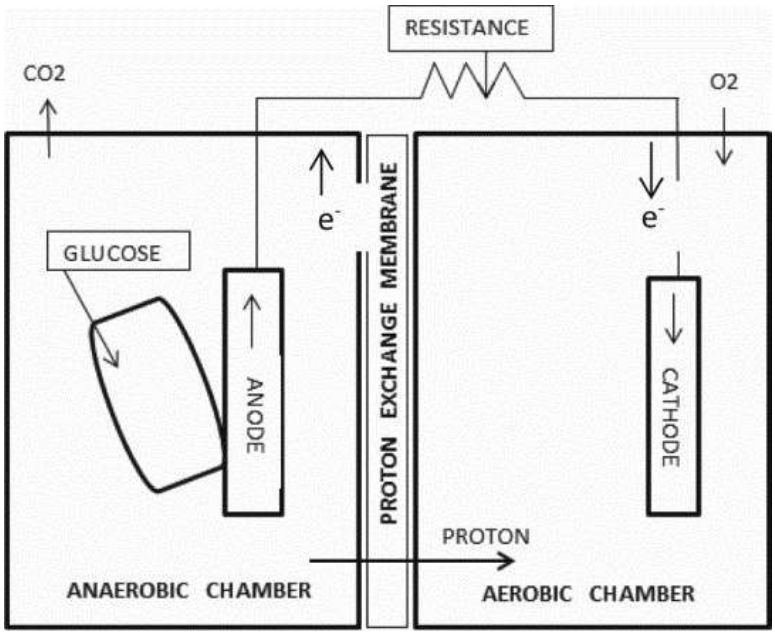
محصولات بیوالکتریک شامل انرژی الکتریسیته با هضم بی‌هوازی بسترهای آلی توسط میکروب‌ها یکی از به‌روزترین روش‌های تولید انرژی به‌شمار می‌آید. پیل سوختی میکروبی (MFC) دستگاهی است که انرژی شیمیایی آزادشده در نتیجه اکسیداسیون منابع پیچیده کربن آلی که به‌عنوان بستر اصلی توسط میکروارگانیسم‌ها به‌کار می‌رود را برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند و در نتیجه وسیله کارآمدی برای تولید انرژی پایدار است. الکترون‌های آزادشده در اثر متابولیسم میکروبی برای حفظ ظرفیت انرژی تولیدشده و همچنین کاهش انتشار کربن جذب می‌شوند.

پارامترهای مختلف دخیل در فناوری MFC برای تولید برق شامل حداکثر چگالی توان، بازده و گاهی اوقات میزان حذف اکسیژن شیمیایی است که اثربخشی دستگاه را نشان می‌دهد. استفاده از میکروب‌ها در جهت پالایش زیستی و در نتیجه تولید برق، فناوری MFC را به یک پیشنهاد بسیار سودمند تبدیل می‌کند که می‌تواند در بخش‌های مختلف مدیریت پسماندهای صنعتی، شهری و کشاورزی نیز مورداستفاده قرار گیرد. اگرچه کارایی MFC ها در تولید برق در ابتدا کم بود اما تغییرات اخیر در طراحی، اجزا و عملکرد باعث افزایش توان خروجی به سطح قابل‌توجهی شده است.

MFC معمولاً از چندین جزء تشکیل شده که عمدتاً به دو اتاق تقسیم شده‌اند. یعنی محفظه آندی و کاتدی که به ترتیب شامل آند و کاتد هستند. این محفظه‌ها توسط غشای تبادل پروتون از هم جدا می‌شوند (شکل ۲-۹). میکروب‌های موجود در محفظه آندی با یک بستر مطلوب تهیه شده است که به‌طور بی‌هوازی تخریب شده و الکترون‌هایی را که از آند به مدار خارجی (کاتد) منتقل

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

می‌شوند تخریب می‌کند و پروتون‌های تولیدشده به‌صورت انتخابی از غشا مبادله عبور می‌کنند. هر دوی این محصولات به دلیل عملکرد میکروب‌های موجود در محفظه آندی به سمت کاتد سفر رفته و با اکسیژن واکنش داده و آب تولید می‌کنند [۹۳].



شکل ۲-۹ پیل سوختی میکروبی دومحفظه‌ای [۹۳]

۲-۲۲-۱- MFC دو محفظه

این طرح از راکتور میکروبی، طراحی کلاسیک یک MFC بوده که متشکل از محفظه‌های دوگانه است. این دو محفظه توسط غشای تبادل یونی از هم جدا شده‌اند. این مدل معمولاً به‌صورت چند راکتور کنار هم و دسته‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرند و درحال‌حاضر فقط در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شوند.

۲-۲۲-۲- MFC تک‌محفظه:

MFC تک‌محفظه شامل محفظه آندی همراه با کاتد هوا است که پروتون‌ها و الکترون‌ها به آن منتقل می‌شوند. با توجه به نوع آند و کاتد مورداستفاده در این راکتورها، انواع مختلفی برای طراحی آنها پیشنهاد شده است (جدول ۲-۲).

جدول ۲-۲ انواع مختلف MFC های تک‌محفظه‌ای با توجه به نوع آند و کاتد

Design	Anode	Cathode
Rectangular	Mn^{4+} graphite anode	Fe^{3+} graphite cathode
Cylindrical	Carbon paper without wet proofing	Carbon electrode/PEM assembly or rigid carbon paper without PEM.
Tubular	Granular graphite matrix	Ferricyanide solution
Concentric design	Graphite	Air porous made up of carbon/Pt catalyst
Flat plate	Carbon paper	Carbon cloth

۲-۲۲-۳- سیستم انباشته

سوخت میکروبی انباشته مجموعه‌ای از MFC ها است که به‌صورت سری یا به‌صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. MFC را می‌توان با اجرای تنظیمات مختلف الکترودها و تغییر نوع جریان روی هم قرار داد. این تنظیمات می‌تواند چهار نوع باشد (i) اتصالات الکترود سری در حالت جریان موازی، (ii) اتصالات الکترود موازی در حالت جریان موازی، (iii) اتصالات الکترود سری در

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

حالت جریان سری و (iv) اتصالات الکترود موازی در جریان سری. مطالعات دلالت بر یک تغییر نوآورانه احتمالی در فناوری MFC دارد که می‌تواند به افزایش توان خروجی کمک کرده و در نتیجه به‌کاربردهای مختلف MFC کمک کند. به‌منظور بهینه‌سازی و بهبود عملکرداین سیستم‌ها، تغییرات در برخی از قسمت‌های مهم باعث تغییرات به‌سزایی خواهد شد. این تغییرات در ادامه ارائه شده است.

۲ ۲۲ ۳ ۱ استفاده از غشای انتقال پروتون (PEM[1])

در فناوری MFC، خنثی‌سازی الکتریکی بین دو اتاق، یک پیش‌نیاز بسیار مهم برای عملکرد کارآمد آن است که توسط غشای انتقال‌دهنده پروتون (PEM) به دلیل انتقال پروتون‌ها در سراسر غشا به‌دست آمده است. PEM یک جزء بسیار مهم از مجموعه MFC است که به جداسازی محفظه‌های آند و کاتد و همچنین تسهیل انتقال پروتون‌ها به کاتد برای حفظ جریان الکتریکی کمک می‌کند. ویژگی‌های ایدئال PEM شامل معیارهای زیر است:

- مقرون‌به‌صرفه
- افزایش رسانایی پروتون
- خواص تفکیک خوب
- افزایش قدرت مکانیکی
- مقاومت در برابر حرارت و مواد شیمیایی
- مقاومت الکترونیکی بالا

لازم به یادآوری است که سطح PEM نقش مؤثری در تولید توان MFC دارد. طی تحقیقات مشخص شده است که سطح PEM زمانی که سطح آن به دلیل مقاومت داخلی کوچک‌تر از الکترودها باشد، توان خروجی را محدود می‌کند.

1 Proton-exchange membrane

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲ ۳ ۲۲ ۲ واسطه‌ها

الکترون‌های تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌ها به دلیل تخریب بی‌هوازی بستر نیاز به واسطه‌ای برای انتقال به الکترود دارد. واسطه ترکیبی است که پتانسیل اکسیداسیون کمی دارد و در غلظت خاصی به محیط رشد اضافه می‌شود و الکترون‌ها را از واکنش‌های متابولیکی میکروب‌ها خارج کرده و این الکترون‌ها را به الکترود آند می‌رساند. یک واسطه ایدئال موجود در MFC باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- در هر دو حالت اکسیدشده و کاهش‌یافته پایدار باشد
- محلول در سیستم‌های آبی باشد
- دارای ظرفیت بالای e^- باشد

۳ ۳ ۲۲ ۲ عملکرد کاتد

کاتدهایی که معمولاً در MFC ها استفاده می‌شوند، الکترودهای کربنی با روکش پلاتین هستند که در آب الکترودهای کربن ساده در محلول فریسیانید غوطه‌ور شده‌اند. سطح کاتد یکی از عواملی است که بر تولید برق در MFC تأثیر می‌گذارد. استفاده از گرانول‌های گرافیت و کاتالیزور بر روی غشا باعث افزایش سطح کاتد و همچنین رسانایی الکتریکی آن می‌شود.

۴ ۳ ۲۲ ۲ عملکرد آند

موادی که بیشتر می‌توانند برای آند در MFC استفاده شوند شامل کربن در قالب‌های مختلف مانند گرانول، میله، صفحات و همچنین به‌عنوان مواد فیبری (نمد، فوم، مش، پارچه، کاغذ و الیاف) هستند. یک آند سه‌بعدی برای تولید برق مؤثرتر است زیرا سطح بیشتری را برای اتصال میکروب‌ها فراهم می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۳- مدل های مختلف MFC

۲-۲۳-۱- مدل بدون واسطه

برخی از واسطه‌ها دارای ماهیت معدنی هستند و طبیعت سمی بالقوه‌ای را برای راکتور میکروبی مورداستفاده در سیستم MFC ایجاد می‌کنند. بنابراین به‌منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از ماهیت معدنی این واسطه‌ها، MFC های بدون واسطه توسعه یافته‌اند. بدین‌ترتیب، در این نوع راکتورها تشکیل بیوفیلم در سطح آند توسط میکروب‌های الکتروشیمیایی فعال منجر به تولیدکننده برق می‌شود.

۲-۲۳-۲- مدل بدون غشاء

همان‌طور که گفته شد، PEM به‌عنوان وسیله‌ای برای انتقال پروتون‌های تولیدشده در نتیجه تخریب میکروبی به محفظه کاتدی عمل می‌کند. در مدل‌های MFC بدون غشاء استفاده از PEM حذف می‌شود، که باعث ایجاد اختلاف بالقوه غشایی شده و به نوبه خود منجر به مقاومت در برابر جریان یون‌ها در الکترولیت‌ها می‌شود.

۲-۲۳-۳- مدل دارای کاتد با روکش کاتالیزور

مواد شیمیایی خاصی وجود دارد که روی سطح الکترودها برای افزایش کارایی آنها پوشانده شده است. این مواد شیمیایی عمدتاً شامل پلیمرهای رسانا مانند پلی‌انیلین هستند که می‌توانند در انتقال الکترون به الکترود کمک کنند. پلیمرها می‌توانند فعالیت کاتالیزوری پلاتین را نسبت به هیدروژن تشکیل‌شده تقویت کنند و همچنین از آن در برابر مسمومیت محافظت کنند.

۲-۲۳-۴- MFC های رسوبی

مفهوم این نوع MFC شامل قرار دادن یکی از الکترودها (آند) در رسوبات بی‌هوازی است که از هر دو، بسترهای آلی و قسمت میکروبی تشکیل شده است. این الکترود به کاتدی متصل می‌شود که در آب هوازی قرار می‌گیرد. MFC نوع رسوبی را می‌توان با تغییرات مختلف همراه کرد و آنها را بسته به نوع کاتالیزور میکروبی و همچنین روند تولید و انتقال الکترون از یکدیگر متمایز کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۴- مزایا و معایب پیل‌های سوختی میکروبی

۲-۲۴-۱- مزایا:

همان‌طور که گفته شد، کاربردهای مختلف فناوری MFC شامل تولید بیوالکتریک از منابع مختلف آلی مانند زیست‌توده پسماند جامد، ضایعات مواد غذایی، فاضلاب خانگی و دیگر فاضلاب‌ها و غیره است. تولید انرژی پایدار فاضلاب‌های صنعتی و خانگی یعنی فاضلاب، گاو، خوک و فاضلاب آبجوسازی به‌عنوان بسترهای بالقوه در فناوری MFC تولید شده‌اند که نتایج کارآمدی را ایجاد می‌کند.

بنابراین، اساساً فناوری MFC با هدف ایجاد انرژی پاک از محصولات زائد تولیدشده در جامعه از طریق تبدیل کارآمد با استفاده از میکروب‌ها ایجاد می‌شود. این فناوری برخلاف ابزارهای تجدیدپذیر انرژی، زباله و انرژی تولیدشده توسط جامعه‌ی ما را بازیافت می‌کند و باعث می‌شود آن را دوباره از بین ببرد و عوارض جانبی مضر خطر محیط زیست را از بین ببرد. علاوه‌براین برآورد می‌شود در ازای هرکیلووات ساعت برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای زغال‌سنگ، می‌توان از انتشارحدود یک کیلوگرم CO_2 جلوگیری کرد.

ازاین‌رو بهبود مداوم پیل‌های سوخت میکروبی و مطالعات گسترده در این حیطه، افزایش نیرو و کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید نیرو در این سیستم‌ها را در پی خواهد داشت. افزون‌برآنکه ممکن است برون‌دادهای دو و یا چندگانه‌ی دیگری را نظیر تصفیه هم‌زمان پساب به دنبال داشته باشد. با این حال مشکلات و محدودیت‌های فراوانی در این زمینه وجود دارد که نیازمند پژوهش‌های منحصرشده‌تر و در مقیاس کابردی وسیع‌تر است.

۲-۲۴-۲- معایب

محدودیت‌های زیادی وجود دارد که فناوری MFC از نظر استفاده و کاربرد آن در تولید انرژی با آن روبه‌رو است. یکی از مهم‌ترین معایب، ناتوانی در افزایش مقیاس مدل‌های MFC در مقیاس بزرگ و تجاری است. درحال‌حاضر تولید برق توسط فناوری MFC در مقایسه با هضم بی‌هوازی متانوژنیک از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. دمای کارکرد نیز به‌عنوان یک محدودیت برای فناوری MFC عمل می‌کند زیرا واکنش‌های میکروبی در دمای زیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌شوند. عوامل متعددی در

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

تعیین کارآیی فناوری MFC دخیل هستند، یعنی عوامل فنی مانند مقاومت داخلی، پتانسیل الکترودها و در دسترس بودن اکسیژن که مانعی در جهت افزایش پتانسیل فناوری MFC به‌صورت تجاری و اقتصادی است.

بدین‌ترتیب، فناوری تولید بیوالکتریک می‌تواند از طریق روش‌های مختلف برای دستیابی به اهداف مختلف اعم از تولید انرژی تا تولید سوخت زیستی و همچنین پالایش زیستی به‌کار گرفته شود. تولید انرژی الکتریکی از میکروب‌ها می‌تواند به‌عنوان یک منبع پایدار انرژی عمل کند و استفاده از سوخت‌های فسیلی و در نتیجه انرژی سبز را به حداقل برساند. علاوه‌براین برآورد می‌شود در ازای هرکیلو وات ساعت برق تولیدی از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای زغال‌سنگ، می‌توان از انتشارحدود یک کیلوگرم CO_2 جلوگیری کرد. همچنین، هضم بی‌هوازی مواد زائد، آلاینده‌ها و مواد شیمیایی می‌تواند راه مؤثری برای حفظ خلوص محیط و تولید انرژی تجدیدپذیر باشد [۹۴].

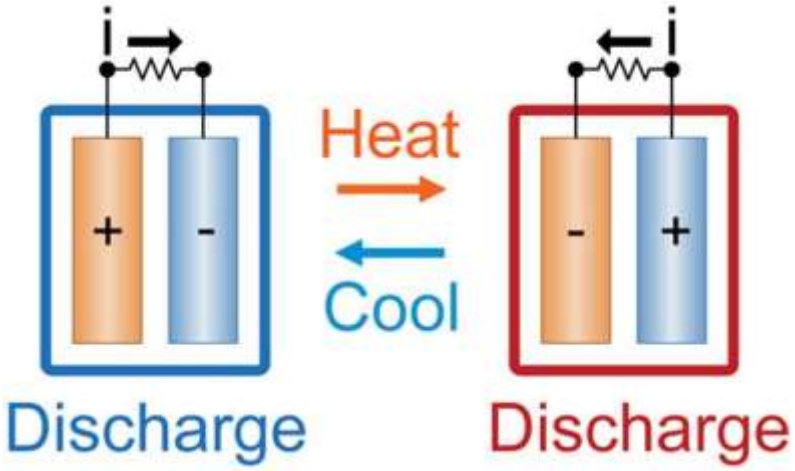
۲-۲۵- تولید انرژی بر پایه تبدیل حرارت ناشی از انبارش جریان الکتریکی

بسیاری از برنامه‌های کاربردی آینده، به میلیاردها حسگر متصل به اینترنت نیاز دارند. دستگاه‌هایی که این برنامه‌ها را فعال می‌کنند باید کوچک، انعطاف‌پذیر، قابل‌اعتماد و پایدار از نظر محیط زیست باشند. محققان باید ابزارهای جدیدی فراتر از باتری‌ها برای تغذیه این دستگاه‌ها بسازند، زیرا تعویض مداوم باتری‌ها دشوار و گران است. محققان دانشگاه اوساکا نشان داده‌اند که چگونه می‌توان از اثر ترموالکتریک یا تبدیل تفاوت دما به الکتریسیته برای تغذیه انرژی دستگاه‌های کوچک و انعطاف‌پذیر استفاده کرد.

این نوع سلول برای شارژ باتری فقط به گرمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد و در مقایسه با دستگاه‌های مشابه که یا نیاز به مدار خارجی برای شارژ یا منابع حرارتی با درجه حرارت بالا (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارند، یک قدم به جلو تلقی می‌شود.

سلول ذکرشده در دمای بالاتر (۶۰ درجه سانتی‌گراد) سلول (که از نانوذرات آبی پروس و فروسیانید ساخته شده است) شارژ شده و پس از سرد شدن تا دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، تخلیه می‌شود. در دماهای پایین‌تر، سلول انرژی بیشتری نسبت به شارژ مورداستفاده قرار می‌دهد، بنابراین گرما را به الکتریسیته تبدیل می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۲-۱۰ تولید انرژی بر پایه تبدیل حرارت ناشی از انبارش جریان الکتریکی [۹۵]

مطالعات نشان داد که چرا عملکرد دستگاه‌های ترموالکتریک تا به امروز هنوز به پتانسیل کامل خود نرسیده است. به‌طورکلی ژنراتورهای حرارتی که عملکرد تبدیل حرارت به انرژی را بر عهده دارند دارای مزایای زیادی هستند. استفاده در مقیاس مختلف و عدم نیاز به تعویض مکرر از مهم‌ترین مزایای این نوع مولدهای انرژی است. واضح است که محققان باید بر بهبود مقاومت در برابر تماس حرارتی و الکتریکی تمرکز کنند تا توان خروجی را بهبود بخشد [۹۵].

۲-۲۵-۱- مزایا و معایب روش تولید جریان الکتریسته از حرارت

مزایا و معایب زیادی در استفاده از این روش وجود دارد. مهم‌ترین مزایای این روش جلوگیری از هدررفت انرژی تولیدشده در بارتی‌ها به‌منظور استفاده‌ی مجدد است. این موضوع عدم‌نیاز به تعویض برخی باتری‌ها در وسایل حساس مانند حسگرها را با خود همراه دارد. از معایب اصلی این روش نیز می‌توان عدم‌مقیاس‌پذیری و تولید در مقیاس بالاتر را دانست. همچنین گران‌قیمت بودن برخی مواد اولیه جهت راه‌اندازی این سل بازیابی حرارت به انرژی نیز دلیل مهمی برای عدم پیرفت در این تکنولوژی به‌شمار می‌آید.

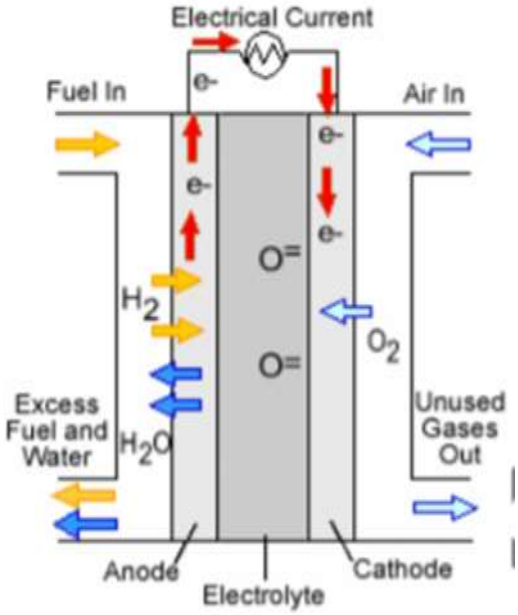
۲-۲۶- توضیحات سیستم‌های بر پایه اکسید جامد

امروزه با گسترش سیستم‌های مختلف تولید انرژی، روش‌های گوناگونی مانند استفاده از انرژی خورشیدی، انرژی باد، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و دیزل ژنراتورها مورداستفاده قرار می‌گیرند، اما هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایب مخصوص به خود هستند. داشتن یک سیستم تولید انرژی قابل اعتماد، کم‌هزینه و همیشه در دسترس، استفاده از پیل‌های سوختی را به‌عنوان

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

کاندید مهمی معرفی کرده است. فناوری پیل سوختی که در آن هیدروژن طی یک سری واکنش‌های الکتروشیمیایی با اکسیژن تولید الکتریسیته و حرارت می‌کند، یکی از بهترین گزینه‌های تولید انرژی الکتریکی در آینده به‌شمار می‌آید. از مزایای این فناوری می‌توان به تولید ناچیز آلاینده‌های زیست‌محیطی، راندمان بالا نسبت به فناوری‌های دیگر، امکان استفاده‌ی همزمان از انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدشده توسط پیل، دامنه گسترده تولید توان از نانووات تا چندین مگاوات، کاربرد در صنایع مختلف همچون حمل‌ونقل، نظامی، هوافضا و غیره، تنوع سوخت مصرفی جهت تولید هیدروژن لازم برای راه‌اندازی پیل سوختی، نداشتن قطعه متحرک و کاهش نیاز به تعمیرات، آلودگی صوتی پایین و غیره اشاره کرد.

یکی از انواع مهم و پرکاربرد پیل‌های سوختی، پیل سوختی اکسید جامد است. دمای عملکردی بالای پیل‌های سوختی اکسید جامد سبب شده است تا در این نوع پیل‌ها بتوان سوخت‌های متنوعی مانند گاز طبیعی را به‌طور مستقیم مورداستفاده قرار داد. این نوع پیل‌ها به دلیل درجه حرارت بالا در خروجی خود، پتانسیل بسیار خوبی را برای استفاده در سیستم‌های هیبریدی دارند. اصول کارکرد این نوع از پیل‌های سوختی در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است [۹۶].



شکل ۲-۱۱ شماتیک سیستم‌های بر پایه اکسید جامد [۹۶]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۶-۱- پیل سوختی اکسید جامد بر پایه الکترولیز

سلول الکترولیز اکسید جامد (SOEC) یک پیل سوختی اکسید جامد است که در حالت احیا برای دستیابی به الکترولیز آب یا دی‌اکسید کربن با استفاده از اکسید جامد یا الکترولیت سرامیکی برای تولید گاز هیدروژن، مونوکسید کربن و اکسیژن به‌کار می‌رود. تولید هیدروژن خالص در این فرایند بسیار قانع‌کننده است؛ زیرا سوخت تمیزی است که می‌توان آن را به راحتی ذخیره کرد و در نتیجه جایگزین بالقوه‌ای برای باتری‌ها است. الکترولیز درحال‌حاضر امیدوارکننده‌ترین روش تولید هیدروژن از آب است که به دلیل راندمان تبدیل بالا و نسبتاً کم انرژی موردنیاز در مقایسه با روش‌های ترموشیمیایی و فتوکاتالیستی، به‌کار گرفته می‌شود.

سلول‌های الکترولیز اکسید جامد در دماهایی کار می‌کنند که اجازه می‌دهد الکترولیز در دمای بالا (معمولاً بین ۵۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد) رخ دهد. این دمای عملیاتی مشابه شرایط برای پیل سوختی اکسید جامد است. واکنش خالص سلول‌ها گازهای هیدروژن و اکسیژن تولید می‌کند. واکنش‌های یک مول آب در زیر نشان داده شده است که با اکسیداسیون آب در آند و کاهش آب در کاتد رخ می‌دهد.

$$\text{Anode: } 2\ O^{2-} \rightarrow O_2 + 4\ e^-$$

$$\text{Cathode: } H_2O + 2\ e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$$

$$\text{Net Reaction: } 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_2 + O_2$$

با توجه به اینکه فرایند در دمای بالا رخ می‌دهد، استفاده از منابع تجدیدپذیر در این نوع واکنش‌ها بسیار کارآمد است. بنابراین تحقیقات درزمینه‌ی استفاده از منابع خورشیدی و یا تلفات انرژی و حرارت برخی کارخانجات بسیار در این زمینه اهمیت دارد.

۲-۲۶-۲- روش غشای انتقال اکسیژن برای تولید جریان الکتریکی

اساس کار اصلی غشاهای انتقال اکسیژن (OTM[1]) تفکیک O2 در مکانیسم الکتروشیمیایی غیر گالوانیکی است که در غشای متراکم انتقال یون O-2 رخ می‌دهد. یعنی بدون اعمال ولتاژ خارجی و ایجاد جریان الکتریکی در مدار خارجی انتقال یون صورت می‌پذیرد. نیروی محرک فرایند فقط به تفاوت پتانسیل شیمیایی O-2 بین دو طرف غشاء وابسته است. مطالعات اخیر به نکاتی

1 Oxygen Transport Membrain

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

مهمی برای بهبود انجام فرایند غشای انتقال‌دهنده اکسیژن پرداخته است. سرعت تبادل یون اکسیژن در دو طرف غشاء، کنترل هدایت یونی غشاء، بهینه‌سازی دما و فار سیستم، جلوگیری از آثار مخرب زیست‌محیطی و غیره از مهم‌ترین این نکات موردمطالعه به‌شمار می‌رود.

۲-۲۷- روش الکترودیلیز معکوس (RED[1]) برای تولید انرژی الکتریکی

مدت‌ها است که تولید انرژی الکتریکی حاصل از اختلاف غلظت شوری (SGP[2]) آب به منزلهٔ یکی از منابع تجدیدپذیر مطرح شده است. این انرژی از طریق اختلاط دو محلول آب حاوی غلظت‌های متفاوت نمک به‌دست می‌آید. بر اساس مطالعات می‌توان برای این منظور از منابع گوناگونی به شرح جدول ۲-۳ استفاده کرد. اختلاف غلظت نمک در دو منبع آب غلیظ و رقیق مطابق جدول ۲-۳ با ازدیاد آنتروپی ناشی از اختلاط آنها با اتلاف اگزرژی[3] شیمیایی همراه است که با بازیافت بخشی از این جریان اگزرژی شیمیایی با استفاده از روش اسمزی یا یکی از روش‌های استحصال، تولید انرژی مفید مکانیکی یا الکتریکی ممکن می‌شود.

جدول ۲-۳ اختلاف غلظت نمک در دو منبع آب غلیظ و رقیق [۹۷]

منبع غلیظ	منبع رقیق	دامنهٔ اختلاف غلظت (گرم بر لیتر)
آب دریا	رودخانه	۱۰ تا ۴۰
آب دریا	فاضلاب شهری	۳۰ تا ۴۰
پساب آب‌شیرین‌کن‌ها	آب دریا	۳۰ تا ۳۵
پساب معادن و کارخانجات	آب دریا	تا ۳۵۰

1 reversed electrodialysis
2 Salinity Gradient Power
3 Exergy

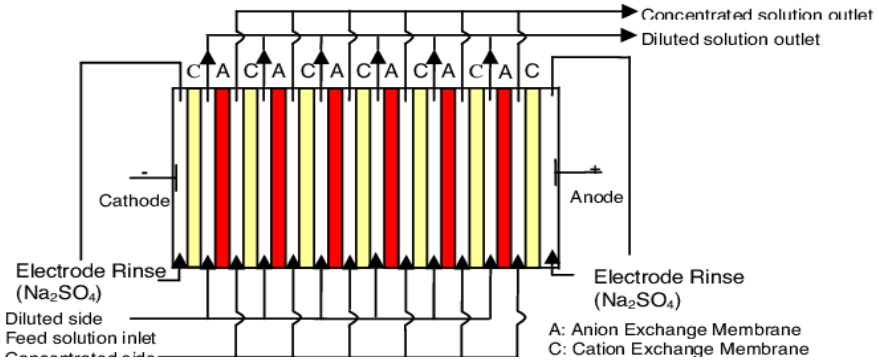
DOI: 10.30503/nripress.2020.144

نمک		
آب دریاچه‌های بسیار شور	آب دریا	تا ۳۵۰
آب تغلیظ‌شده دریا	آب دریا	تا ۳۵۰

با توجه به اینکه معضلات و نگرانی‌های زیست‌محیطی بسیاری درخصوص پساب تأسیسات آب‌شیرین کن در سطح جهان مطرح و بررسی شده‌اند، تولید انرژی با استفاده از این پساب از دو مزیت عمده برخوردار است:

۱. کاهش غلظت املاح در پساب تأسیسات آب‌شیرین‌کن و در نتیجه مقابله با مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آن
۲. تولید انرژی الکتریکی برای تأمین بخشی از انرژی موردنیاز

روش‌های متفاوتی برای تولید انرژی از اختلاف غلظت شوری آب ارائه شده است که تقریباً اغلب آنها برعکس روش‌های متداول نمک‌زدایی مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز (ED[1]) است. روش الکترودیالیز معکوس (RED[2]) از سال ۱۹۵۲ معرفی شد. در این روش غشاهای نیمه‌تراوایی آنیونی و کاتیونی به‌صورت یک در میان در مجموعه‌ای به نام استک قرار دارند. دو محلول با غلظت‌های مختلف نمک در آبراه‌های ایجادشده در دو طرف هر غشا مطابق شکل ۲-۱۲جریان می‌یابند.



شکل ۲-۱۲ شماتیک استک در الکترودیالیز معکوس [۹۷]

این غشاهای تبادل یونی به ترتیب فقط به کاتیون‌ها و آنیون‌ها اجازهٔ عبور می‌دهند. عبور آنیون‌های موجود در محلول غلیظ‌تر از غشای آنیونی و کاتیون‌ها از غشای کاتیونی به سمت محلول رقیق‌تر، سبب ایجاد اختلاف پتانسیل در دو سوی سلول می‌شود که در نتیجه اکسایش و کاهش یک گونه الکتروفعال مانند نمک‌های آهن روی الکترودهای آند و کاتد در دو

1 Electro Dialysis
2 Reverse Electro Dialysis

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سمت استک حاصل و جریان الکتریکی در مدار خارجی برقرار می‌شود. نیروی محرکهٔ انتقال یک گونه در دو محلولِ در حال اختلاط با غلظت‌های مختلف، اختلاف انرژی آزاد گیبس یا به عبارت دیگر اختلاف پتانسیل شیمیایی بین دو محلول است.

توان تولید انرژی، اختلاف پتانسیل ایجادشده، بازدهی انرژی و کارایی استک به نوع غشا و مشخصات آن بستگی دارد. در فرایند معکوس الکترودیالیز از طیف گسترده‌ای از انواع غشاهای تبادل کاتیونی و آنیونی استفاده می‌شود که هر کدام ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. از جمله خصوصیات غشاهای تبادلگر یونی که بر کارایی استک، شامل بازدهی انرژی و چگالی توان تأثیر می‌گذارند می‌توان به مقاومت الکتریکی و گزینش‌پذیری انتخابی غشاء اشاره کرد. هرچه مقاومت الکتریکی غشاء پایین و گزینش‌پذیری انتخابی آن بالا باشد، کارایی استک بالاتر خواهد بود. این دو مشخصه به میزان بار تثبیت‌شده روی بستر پلیمری و نوع و میزان تبادلگر یونی و گروه عاملی قراردادهشده روی بستر پلیمری بستگی دارند [۹۷].

۲-۲۷-۱- جزئیات روش سل الکترودیالیز معکوس

در الکترودیالیز ۵ قسمت اصلی شامل: ۱. جریان الکتریسیته ۲. الکترودها ۳. غشاهای تبادل یونی ۴. محلول‌ها ۵. الکترولیت‌ها وجود دارد. فضای بین غشاءها در دستگاه الکترودیالیز سلول نامیده می‌شود و تعداد این سلول‌ها بستگی به خوراک ورودی به سیستم برای تصفیه دارد. غشاءهای الکترودیالیز به ۲ صورت همگن و ناهمگن ساخته می‌شوند؛ ۲ نوع غشاء مورداستفاده در این دستگاه است: ۱. غشاء تبادل کاتیونی که فقط اجازه‌ی عبور یون‌های مثبت را از خود می‌دهد و ۲. غشاء تبادل آنیونی که فقط اجازه‌ی عبور یون‌های منفی را از خود می‌دهد.

الکترودهای مورداستفاده در این تجهیز باید از گونه‌ای انتخاب شوند که در برابر خوردگی مقاوم بوده و رسانای خوبی برای جریان الکتریکی باشند. زیرا آند ماهیت خورندگی دارد. جنس این الکترودها را معمولاً از تیتانیومی که توسط پلاتین یا اکسیدهای فلزی نظیر روبیدیم و ایریدیوم آبکاری می‌شوند، انتخاب می‌شود.

مشکل عمده‌ای که در فرایند الکترودیالیز (ED) وجود دارد گرفتگی غشاها و کاهش بازدهی فرایند است که برای برطرف کردن این مشکل از روش الکترودیالیز معکوس (RED) استفاده می‌شود. البته برای انجام یک فرایند مطلوب نیاز به یک تصفیه‌ی مقدماتی جهت جلوگیری از تشکیل رسوب و مسدود شدن غشاها باید صورت بگیرد و مواردی که برای تصفیه موردنیاز است کاملاً به خوراک

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

ورودی بستگی دارد. پیش‌تصفیه‌ی موردنیاز برای این فرایند می‌توان به فیلتراسیون (از نوع مدیا فیلتراسیون)، لخته شدن و رسوب‌گذاری اشاره کرد.

۲-۲۷-۲- ویژگی آب ورودی به RED:

فاکتورهای آبی که به‌عنوان خوراک ورودی به این دستگاه بررسی شده، به این شکل است که فاکتورهای سیلیس، کلسیم کربنات، سولفات کلسیم، سولفات باریم و سولفات استرانسیم دائما باید کنترل شود؛ اما در مورد دیگری، عناصر آلومینیوم، منگنز، آهن و H2S جزو موارد کنترلی برای آب ورودی به دستگاه معرفی شده است. همین‌طور طبق موارد گفته‌شده میزان TDS، TOC، PH، Free chlorine و Silica نیز در برخی استک‌ها باید موردبررسی قرار گیرد. سیستم‌های (RED) و استفاده از آنها به‌عنوان یک روش برای پیشگیری از رسوب‌گذاری یا از بین بردن رسوب در الکترودها است. در این فرایند ولتاژ در الکترودها به‌طور زمان‌بندی‌شده معکوس می‌شود که این عمل باعث تغییر جهت یون و جداشدن مواد با بار الکتریکی از سطح غشاء می‌شود. در این روش بدون نیاز به هرگونه مواد شیمیایی امکان تصفیه‌ی آب با غلظت بالایی از نمک اشباع، فراهم می‌شود.

۲-۲۷-۳- شرح ساختار و عملکرد STACK های RED

دستگاه (RED) از غشاهای مستطیلی‌شکل بنام استک (STACK) تشکیل شده‌اند که انتهای آنها توسط یک الکترود خاتمه می‌یابد. این غشاهای درون استک به‌طور تناوبی از کاتیون و آنیون مرتب می‌شوند و از فناوری‌های الکترودیالیز مونتاژ اسپیسرها (spacers) و الکترودهای غشایی است.

استک‌ها با پمپ‌ها، لوله‌کشی و سیم برق ساخته شده‌اند و شامل منبع تغذیه DC با قابلیت تنظیم، یکسوکننده‌ها برای تبدیل جریان متناوب AC به جریان DC، تنظیم داخلی سیستم با کنترل‌ها، زمان معکوس و آلارم‌ها هستند.

سازه اصلی استک‌ها شامل:

۱. غشاء تبادل آنیونی

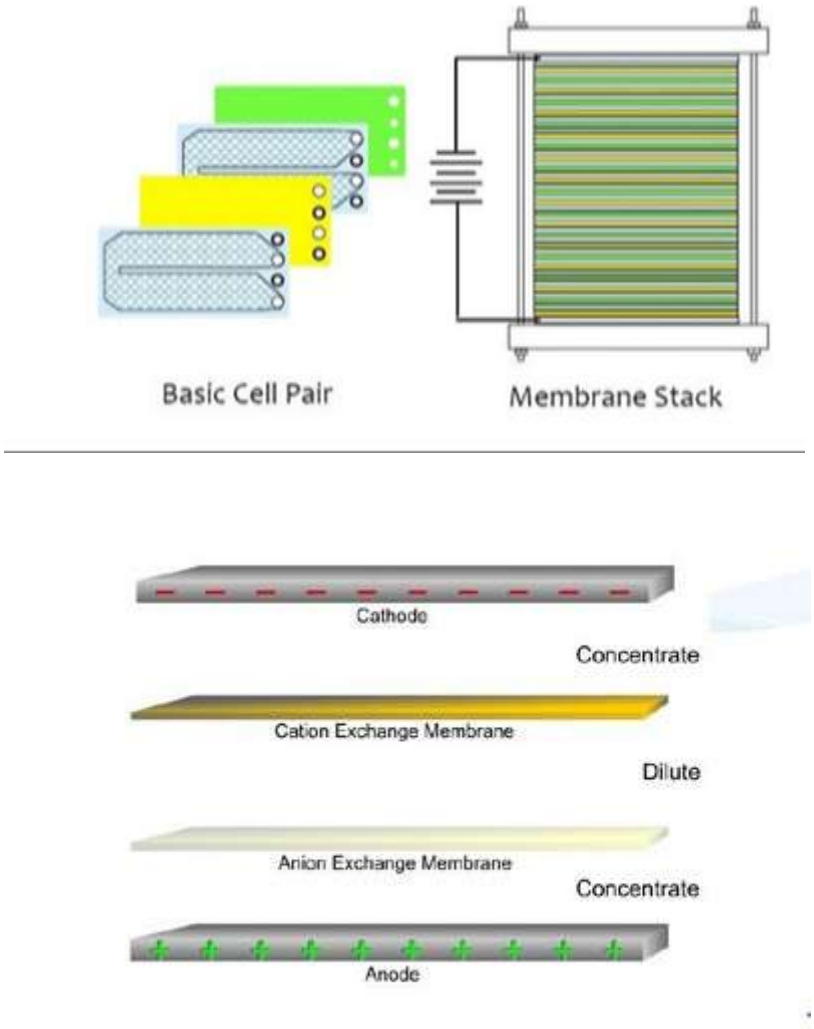
۲. فاصله‌دهنده متمرکز (SPACERS CONCENTRANING)

۳. غشاء تبادل کاتیونی

۴. جداکننده‌ی یون زدایی (DEMINERAZILING SPACERS)

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۵. چند صد جفت سلول که به‌صورت افقی یا عمودی بین ۲ الکترود قرار گرفته‌اند، هستند.



شکل ۲-۱۳ ساختار و عملکرد STACK های RED [۹۷]

۲-۲۸- مزایا و معایب روش الکترودیالیز معکوس

یکی از مهم‌ترین عوامل در میزان سنجش کارایی الکترودیالیز معکوس چگالی توان است. چگالی توان به‌صورت توان خروجی بر واحد سطح غشا تعریف می‌شود و در مطالعات الکترودیالیز معکوس نماینده میزان تولید انرژی و بازده فرایند است. با پیشرفت در

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

ساخت غشاها، بهبود طراحی و دیگر موارد عملیاتی، به مرور زمان چگالی توان خروجی از مولدهای RED افزایش یافته است. گرفتگی و رسوب غشا نیز مسئله مهمی است که در پژوهش‌ها به آن توجه بسیاری شده است؛ چرا که ممکن است موجب کاهش قابل‌توجهی در چگالی توان به‌دست‌آمده شود.

در روش الکترودیالیز معکوس، عوض شدن بار الکتریکی الکترودهای کاتد و آند، موجب جلوگیری از رسوب و افزایش طول عمر سیستم می‌شود. در الکترودیالیز معکوس (RED) برخلاف روش‌های سنتی که حذف آلودگی از طریق کانال‌های ریز موجود در ساختار غشا صورت می‌گیرد، مکانیزم القای یونی سبب انتقال آلودگی‌ها از یک جریان به جریان دیگر است.

با توسعه تکنولوژی الکترودیالیز، این روش را می‌توان به‌عنوان روشی نوین در جدا کردن نمک‌ها، یون‌های مزاحم مانند نیترات و فلزات سنگین از آب و پساب پیشنهاد کرد. علاوه بر مزیت ویژه آن که بازیابی تا ۹۵٪ است، وجود هزینه عملیاتی بسیار پایین نسبت به روش‌های دیگر از مزایای منحصربه‌فرد این روش به‌شمار می‌آید. لازم به یادآوری است که در روش الکترودیالیز هزینه عملیاتی به‌طور عمده شامل مصرف برق خواهد بود.

۲-۲۸-۱- مزایای روش الکترودیالیز معکوس (RED)

- راندمان بالای بازیابی جریان تا حدود ۹۵٪
- طول عمر بالای غشاهای مورداستفاده تا ۱۰ سال
- عدم استفاده از مواد شیمیایی مکمل طی فرایند
- هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری بسیار پایین در مقایسه با روش‌های سنتی مرسوم از جمله اسمز معکوس
- عدم نیاز به پیش تصفیه
- عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای

نقص بزرگ این روش هم مربوط به این است که در زمان وارونه شدن قطبیت، مقداری از آب دور ریخته می‌شود و بهره‌وری تولید آب شیرین یا انرژی الکتریسیته پایین است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲-۲۸- راندمان روش الکترودیالیز معکوس

در روش الکترودیالیز معکوس از عبور نمک (به جای آب) از میان مجموعه‌ای از غشاها استفاده شده، اما با این روش نیز باوجود برطرف‌سازی مشکل غشا، انرژی تولیدشده بسیار کم است. به‌منظور حل این سری از مشکلات، دانشمندان از ادغام روش‌های الکترودیالیز معکوس و مخلوط برق گنجایی[1] در یک سل شیمیایی استفاده کرده‌اند. این فناوری یک روش نسبتاً جدیدی بوده که اساس کار آن، قرارگیری دو الکترود در محلول آب‌هایی با غلظت‌های متفاوت بوده که عبور آب نمک از میان این الکترودها منجر به تولید ولتاژ و توان الکتریکی می‌شود. البته لازم به یادآوری است که این روش نیز در صورت استفاده آن به تنهایی، توان الکتریکی پایینی تولید می‌کند. بنابراین با بررسی‌های بیشتر، دانشمندان به این نتیجه رسیده‌اند که ادغام این فناوری با روش الکترودیالیز معکوس، منجر به انرژی تولیدی بیشتر در حدود چهار برابر انرژی تولیدی روش الکترودیالیز معکوس می‌شود. از طرفی مهار انرژی غلظت‌های متفاوت آب نمک با این فناوری جدید می‌تواند منجر به تأمین بیش از ۴۰ درصد از نیازهای انرژی الکتریکی شود.

تولید الکتریسیته توسط این روش لزوماً تنها هدف این فرایند نیست. تولید همزمان برق و تصفیه آبهای حاوی آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر فرایندهای متعارف بیولوژیکی در محفظه الکترود توسط واکنش‌های اکسایش و کاهش نیز پیشنهاد شده است. همچنین با ترکیب فناوری الکتروشیمیایی میکروبی و RED، ضایعات بیولوژیکی می‌توانند به الکتریسیته، گاز هیدروژن، متان و دیگر مواد شیمیایی تبدیل شوند.

۲-۲۹- جنبه‌های نوآوری روش الکترودیالیز معکوس

این فرایند با تولید انرژی الکتریکی پاک و همچنین در ترکیب با فرایندهای دیگر جهت بهینه‌سازی انرژی، قابلیت خود را برای صنعتی شدن نشان داده است. تاکنون الکترودیالیز معکوس به دلیل مشکلات اقتصادی و عملیاتی صنعتی نشده است. سه عامل اصلی برای بهبود این فرایند می‌توان در نظر گرفت. نخست، غشاهای تبادل یونی که با پیشرفت در ساخت صنعتی و همچنین انتخابی کردن آنها می‌توان بازدهی و قیمت را در این بخش بهبود بخشید. دوم، مناسب کردن شرایط عملیاتی همچون طراحی محفظه مولد و کنترل رسوب و عامل آخر کاربردهای جدید و ترکیبی برای فرایند الکترودیالیز معکوس همچون بازیابی انرژی از

1 Capacitive mixing

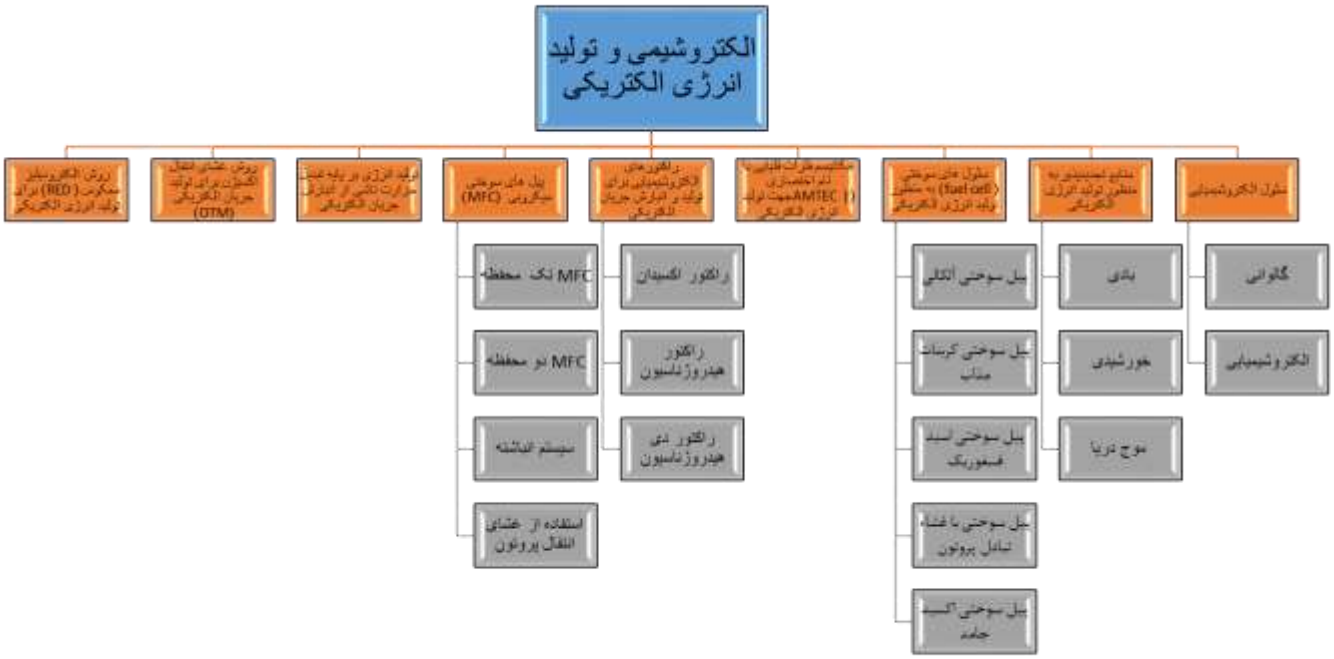
DOI: 10.30503/nripress.2020.144

حرارت هدررفت، ذخیره انرژی و ترکیب فرایند با نمکزدایی. توجه به هر یک از این عوامل نقش مهمی در کاربردی‌تر شدن فرایند الکترودیالیز معکوس ایفا می‌کند. هم‌اکنون با توجه به پژوهش‌های صورت‌گرفته، صنعتی شدن این فرایند در آینده‌ای نزدیک دور از دسترس نیست [۹۸].

۲-۳۰- جمع‌بندی

تولید انرژی به سبک سنتی و استفاده از مواد سوختنی، اعم از چوب و زغال‌سنگ و هیدروکربن‌ها تا انرژی هسته‌ای سهم زیادی از تولید انرژی جهان را دربر می‌گیرند. این نوع تولید انرژی در دنیا رفته‌رفته منسوخ شده و بشر به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و تغییرات اعمال‌شده در کره خاکی به سمت تولید انرژی پاک گام برداشته است. ازاین‌رو، تولید انرژی به روش‌های نوین به‌ویژه استفاده از علم الکتروشیمی مانند سل‌های الکتروشیمی امروزه نگاه جدیدی به تولید انرژی در بین کشورهای توسعه‌یافته ایجاد کرده است. با اینکه تاریخچه پیل‌های سوختی و سل‌های الکتروشیمی به زمان گذشته دور برمی‌گردد. اما بااین‌حال هنوز هم به خوبی نتوانسته است در بین روش‌های تولید الکتریسیته جایگاه خود را پیدا کند. بنابراین در این فصل مباحث مربوط به تولید هیدروژن و انرژی از طریق روش‌های الکتروشیمی به خوبی ذکر شده است و این جمع‌آوری نگاه تازه‌ای به خبرگان امر جهت تحقیقات در این زمینه خواهد داد. همچنین درخت فناوری در این بخش به‌صورت زیر در شکل ۲-۱۴ مشاهده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۲-۱۴ درخت فناوری بخش الکتروشیمی و تولید انرژی

۲-۳۱- پروژه‌های پیشنهادی حوزه تولید برق بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی

تولید انرژی بر پایه مکانیسم‌های مانند پیل گالوانیک، پیل سوختی و روش‌های غشایی همچون الکترودیالیز معکوس از روش‌های نوین و عمدتاً با توجیهات فنی–اقتصادی خاص است. امروزه با کاربرد روتین و گسترده نیروگاه‌های حرارتی و گازی، استفاده از پیل‌ها و روش‌های غشایی در مقیاس تولید انرژی الکتریکی بالا کمتر موردتوجه قرار می‌گیرد. بااین‌حال در برخی موارد دیده می‌شود که با توجه به اقلیم منطقه و یا شرایط خاص فنی از این روش‌ها به‌عنوان روش اصلی و یا کمکی تولید جریان الکتریکی نیز بهره گرفته می‌شود. از سوی دیگر، پیل‌های سوختی میکروبی امروزه بسیار موردتوجه و تحقیق قرار گرفته است. این منابع انرژی پراکنده قابلیت استفاده بسیار گسترده‌ای در مناطق به‌صورت پراکنده و ماژولار دارند. فهرست پروژه‌های پیشنهادی درزمینه‌ی تولید جریان الکتریکی بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی به ترتیب الویت به شرح ذیل است:

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۱. روش‌های نوین تولید جریان الکتریسته بر پایه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی
۲. مقدمه‌ای بر منابع تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی
۳. مطالعات مربوط به توجیهات فنی–اقتصادی تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر
۴. روش‌های تولید انرژی الکتریکی بر پایه سلول‌های سوختی گاز سبز مانند هیدروژن
۵. روش‌های تولید هیدورژن بر پایه اصلاح گاز طبیعی (NG reform)، Water Shift Reaction و جداسازی H_2/CO_2
۶. نسل جدید پیل‌های سوختی (Next Generation Fuel Cell)
۷. توضیحات و نکات کلیدی روش تولید جریان الکتریکی بر پایه روش‌های غشایی (Membrane Separation Technologies)
۸. راکتور اکسیدان، هیدروژناسیون و دی‌هیدروژناسیون
۹. مزایا و معایب پیل‌های سوختی میکروبی و میزان سبز بودن آنها
۱۰. بررسی چرخه عمر پیل‌های سوختی
۱۱. سیستم های بر پایه اکسید جامد به‌منظور تولید جریان الکتریسیته (Solid Oxide Electrochemical)
۱۲. مزایا و معایب روش الکترودیالیز معکوس و ارائه جزئیات ساختاری
۱۳. مقدمه‌ای بر روش‌های تولید برق بر پایه الکتروشیمی در گذشته
۱۴. روش‌های بهینه‌سازی تولید جریان الکتریسیته به روش قدیمی از نقطه‌نظر هزینه، چرخه عمر و عملکرد
۱۵. معرفی سلول‌های سوختی (Fuel Cell) به‌منظور تولید انرژی الکتریکی
۱۶. جزئیات روش تولید انرژی الکتریکی بر پایه سلول‌های سوختی و ارائه مکانیسم‌های الکتروشیمیایی
۱۷. مقدمه‌ای بر پیل‌های سوختی تولید انرژی الکتریکی بر اساس نوع سوخت (هیدروژن، متانول، ....)
۱۸. روش تولید هیدروژن بر پایه الکترولیز آب در دمای پایین
۱۹. روش‌های تولید هیدورژن بر پایه الکترولیز آب در دمای بالا
۲۰. روش‌های میکروبی الکتروشیمیایی برای تولید هیدروژن و گاز سنتز
۲۱. پیل سوختی بر اساس سوخت متانول و سایر گازهای سنتزی (SynGas)
۲۲. پیل‌های سوختی دما بالا و پایین (HT و LT)
۲۳. نوع نوین پیل‌های سوخت تحت عنوان (Conventional Fuel Cell)
۲۴. روش تولید جریان الکتریکی با استفاده از پیل‌های سوختی هوشمند و قابل‌حمل (Smart and Portable Fuel Cell)
۲۵. ارائه مکانیسم روش AMTEC به‌منظور تولید جریان الکتریکی (Alkali Metal Thermo-Electrochemical Energy Converters)
۲۶. راکتورهای الکتروشیمیایی برای تولید و انبارش جریان الکتریکی (Electrochemical Reactors for Energy Conversion and Storage)
۲۷. تولید جریان الکتریسته بر پایه پیل‌های سوختی میکروبی (Microbial Fuel Cell in Bioelectricity Production)

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۲۸. فناوری‌های نوین تولید جریان الکتریسیته (Membrane Less و Catalyst Coated Electrode و Sediment Type)
۲۹. مقایسه پیل‌های سوختی میکروبی با پیل سوختی هیدروژن از نقطه‌نظر توجیهات فنی–اقتصادی
۳۰. ارائه مزایای روش‌های تولید انرژی الکتریکی بر پایه پیل‌های سوختی
۳۱. بررسی پیل‌های سوختی و مزایای مربوطه (هزینه پایین، مقاومت مکانیکی، محیط دوست بودن)
۳۲. مکانیسم‌های کلیدی تولید جریان الکتریسته بر پایه تبدیل حرارت ناشی از انبارش جریان الکتریکی در باتری‌ها
۳۳. مکانیسم‌های الکتروشیمیایی تبدیل حرارت تولیدشده در باتری به جریان الکتریکی (Converting Waste Heat into Power)
۳۴. توجیهات فنی–اقتصادی روش تولید جریان الکتریکی از تلفات حرارتی محفظه‌های انبارش باتری
۳۵. روش پیل سوختی اکسید جامد بر پایه الکترولیز برای تولید جریان الکتریکی (Solid Oxide Electrolysis)
۳۶. سل‌های بر پایه پیل سوختی اکسید جامد برای تولید جریان الکتریکی (Solid Oxide Fuel Cell)
۳۷. روش غشای انتقال اکسیژن برای تولید جریان الکتریکی (Oxygen Transport Membrane)
۳۸. فناوری‌های نوین در روش الکترودیلیز معکوس برای تولید انرژی الکتریکی (Reversed Electrodialysis)
۳۹. راندمان روش الکترودیالیز معکوس به همراه توجیهات فنی–اقتصادی روش

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

فصل ۳ حسگر و کاربرد آن در صنعت برق و انرژی

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱- حسگر

سنسور یا حسگر المان حس‌کننده‌ای است که کمیت‌های فیزیکی مانند فشار، حرارت، رطوبت، دما، و... را به کمیت‌های الکتریکی پیوسته (آنالوگ) یا غیر پیوسته (دیجیتال) تبدیل می‌کند. انواع حسگرها در دستگاه‌های اندازه‌گیری مختلف، سیستم‌های کنترل آنالوگ و دیجیتال مانند PLC مورداستفاده قرار می‌گیرند.

کاربرد حسگرها و قابلیت اتصال آنها به دستگاه‌های مختلف از جمله PLC باعث شده است که حسگرها بخشی از اجزای جدانشدنی دستگاه کنترل اتوماتیک باشند. حسگرها اطلاعات مختلف از وضعیت اجزای متحرک سیستم را به واحد کنترل ارسال کرده و باعث تغییر وضعیت عملکرد دستگاه‌ها می‌شوند [۹۹].



شکل ۳-۱ شماتیک عملکرد حسگر [۹۹]

۳-۲- نیاز به حسگر در صنعت

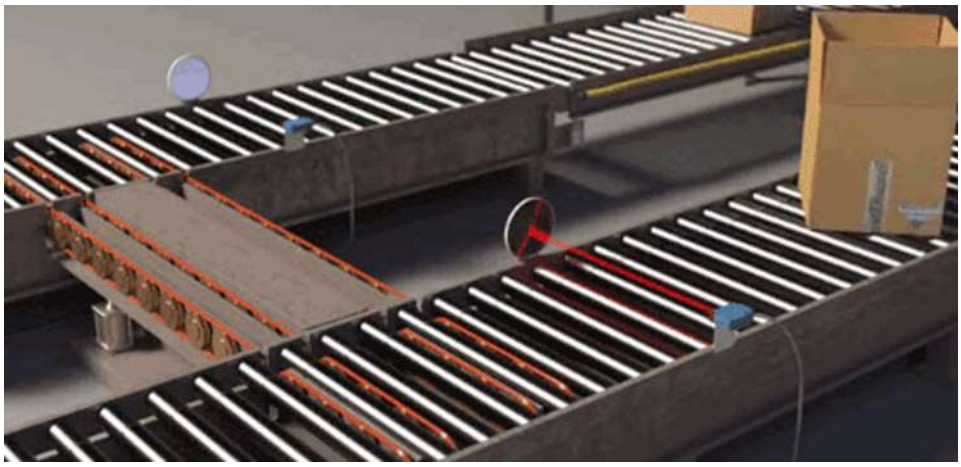
با پیشرفت سریع اتوماسیون و پیچیده‌تر شدن پروسه‌های صنعتی و کاربرد روزافزون این شاخه از صنعت، نیاز شدیدی به‌کاربرد حسگرهای مختلف که اطلاعات مربوط به عملیات تولید را درک و بر اساس این اطلاعات فرمان‌های موردنیاز صادر کند، احساس می‌شود. حسگرها به‌عنوان اعضای حسی یک سیستم، وظیفه جمع‌آوری و یا تبدیل اطلاعات را به‌صورتی که برای یک سیستم کنترل و یا اندازه‌گیری قابل‌تجزیه و تحلیل باشد، به عهده دارند.

در سال‌های اخیر حسگرها به‌صورت یک عنصر غیرقابل تفکیک سیستم‌های مختلف صنعتی به‌ویژه در صنعت برق مورداستفاده قرار گرفته‌اند و پیشرفت سریعی در جهت جواب‌گویی به تقاضاهای صنعت در این شاخه از علم الکترونیک انجام پذیرفته است. همان‌طور که گفته شد حسگرها برای تبدیل عوامل فیزیکی مانند حرارت، فشار، نیرو، طول، زاویه چرخش، دبی و غیره به

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سیگنال‌های الکتریکی به‌کار برده می‌شوند و به همین منظور حسگرهای مختلفی که قابلیت تبدیل این عوامل را به جریان برق دارند، ساخته شده‌اند. یک حسگر را می‌توان با خصوصیات زیر تعریف کرد:

- حسگر به‌عنوان تبدیل‌کننده اطلاعات فیزیکی به سیگنال‌هایی که می‌توان از آنها به‌عنوان سیگنال‌های کنترل استفاده کرد، عمل می‌کنند.
- یک حسگر نباید حتماً یک سیگنال الکتریکی تولید کند مانند حسگرهای نیوماتیکی و . . . .



شکل ۳-۲ نمونه‌ای از حسگر نوری مورداستفاده در کارخانجات تولیدی [۹۹]

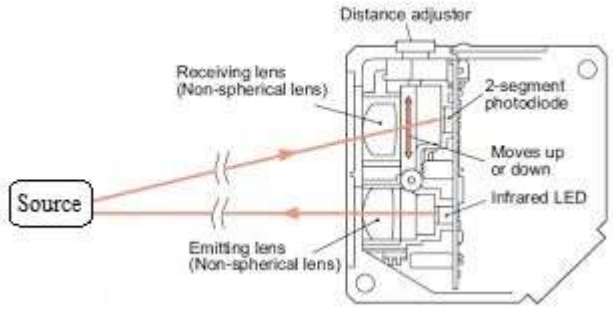
۳-۳- حسگرهای نوری در صنعت برق

حسگر نوری نوعی حسگر بدون تماس مکانیکی است. حسگرهای نوری با تبدیل نور و یا تغییرات دامنه نور به سیگنال‌های الکترونیکی می‌تواند کمیت فیزیکی نور را اندازه‌گیری کند. یک " Photoelectric Sensor" و یا به عبارتی (چشم نوری) در درجه اول از یک فرستنده (Emitter) برای انتشار نور و یک گیرنده (receiver) برای دریافت نور تشکیل شده است. هنگامی که نور ساطع‌شده توسط شیء موردسنجش، قطع یا بازتاب می‌شود، میزان نوری را که به گیرنده می‌رسد تغییر می‌دهد. گیرنده این تغییر را تشخیص داده و آن را به یک خروجی الکتریکی تبدیل می‌کند. منبع نور برای اکثر حسگرهای فوتوالکتریک نور مادون قرمز یا مرئی است (معمولاً قرمز یا سبز است و از نور آبی برای شناسایی رنگ‌ها استفاده می‌شود).

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۳-۱- ساختار حسگر

در حالت کلی حسگرهای نوری ساختار داخلی ساده‌ای دارند. معمولاً حسگرهای نوری از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند (فرستنده، گیرنده، خروجی). در بخش زیر به معرفی اجزای حسگرهای نوری پرداخته شده است:



شکل ۳-۳ شماتیک حسگر نوری [۹۹]

۳-۳-۲- فرستنده[1]

بخش فرستنده، نوری را از حسگر ارسال می‌کند. این نور از (LED[2]) های نیمه‌هادی ساطع می‌شود. در نور فرستنده از الگوریتم پالسی مشخص استفاده شده است، این الگوریتم به حسگر این امکان را می‌دهد که بین نور ارسالی از حسگر و نورهای محیطی مانند نور خورشید تفاوت گذارد.

۳-۳-۳- گیرنده [3]

بخش گیرنده در حسگرهای نوری معمولاً از نوع ترانزیستوری است. گیرنده پس از تشخیص نور ارسال‌شده از فرستنده، آن را به یک سیگنال آنالوگ کوچک تبدیل می‌کند.

1 Light emitter
2 Light Emitting Diode
3 Receiver

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۳-۴- بخش خروجی

مدار خروجی سیگنال آنالوگی که از گیرنده دریافت می‌کند را به یک سیگنال ON/OFF تقویت‌شده یا آنالوگ تبدیل می‌کند، در نتیجه از این سیگنال تقویت‌شده در شمارنده‌ها، تایمرها، رله‌ها و یا کاربردهای دیگر می‌توان استفاده کرد. امروزه در خروجی فتوسل نوری از ترانزیستورهای NPN و PNP استفاده می‌شود و در برخی از مدل‌ها نیز از خروجی رله استفاده می‌شود.

۳-۳-۵- کاربرد حسگرهای نوری

- حسگرهای نوری در بخش نظارت بر سیستم عامل‌های دریایی و قسمت نظارت بر قدرت خط و نظارت چاه استفاده می‌شوند.
- حسگرهای نوری برای برنامه‌های کاربردی نفت و گاز، از جمله نظارت خط لوله مورداستفاده قرار می‌گیرند.
- در گیت‌های ورودی برای تشخیص عبور افراد از حسگرهای نوری با قدرت تشخیص بالا استفاده می‌شود.
- از این حسگرها می‌توان در توربین‌های بادی برای نظارت پره استفاده کرد.
- حسگر کارواش برای کنترل حرکت اتومبیل در کارواش‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد.
- از این حسگر در ورودی آسانسورها و درب‌های اتوماتیک کنترل تردد استفاده می‌شود.
- حسگر تشخیص اجسام شفاف در صنعت برای آشکارسازی شیشه‌های خالی کاربرد دارد.
- در صنایع بسته‌بندی و توزین از حسگرهای نوری به کرات استفاده می‌شود.

به‌طورکلی در راستای استفاده از این نوع حسگر در صنعت برق، این حسگر به‌منظور ردیابی از تجهیزات الکترونیکی استفاده می‌شود و بدین‌منظور از نور مادون قرمز یا قرمز استفاده می‌کند. ازاین‌رو، به‌کارکیری از این نوع حسگر برای پایش میزان خوردگی تجهیزات در بخش‌های نیروگاه اهمیت ویژه‌ای دارد. این حسگرها دارای طول عمر بالایی هستند. از مزیت‌های این حسگر، محکم بودن آن، برد وسیع و موقعیت‌یاب دقیق است و معایب آن هم عدم تشخیص اجسام شفاف هست.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۴- حسگر لومینسانس [1] در صنعت برق

لومینسانس فرایند نور دادن، بدون به‌دست آوردن یا تولید گرما است. این می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی یا بیوشیمیایی، فعالیت ذرات زیر اتمی، تشعشع یا تنش بر روی یک بلور باشد. حسگرهای لومیناس برای تشخیص علائم فسفری قابل‌رؤیت و غیر قابل‌رؤیت، با استفاده از نور ماوراءبنفش، به‌کار می‌روند. این حسگرها برای تشخیص نقطه مرجع لومیناس حتی بر سطوح کاملاً انعکاسی مانند سرامیک، فلزات و یا شیشه‌های آیینه‌ای به‌کار می‌روند.

حسگرهای لومینسانس، نور ماورا UV بنفش را با طول موج ۳۸۰ نانومتر ساطع می‌کنند. اگر نور ساطع‌شده به جسم نورانی برخورد کند، نور را در یک محدوده طول موج قابل‌مشاهده ۴۲۰ – ۷۵۰ نانومتر مطابق با ماده لومینسانس استفاده‌شده منعکس می‌کند. این اثر فلورسنت توسط حسگر لومینسانس به‌منظور تشخیص علائمی که در طول ساعت‌های روز برای چشم انسان قابل‌مشاهده نیستند، موردبهره‌برداری قرار می‌گیرد.

اکسیژن موجود در آب، یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد خوردگی در توربین‌ها و دیگ‌های بخار است. ازاین‌رو برای رسیدن به حداقل میزان خوردگی باید همواره اکسیژن و PH موجود در آب را کنترل کرد. هم‌اکنون در بیشتر نیروگاه‌ها برای اندازه‌گیری اکسیژن موجود در آب از روش‌های شیمیایی استفاده می‌کنند که معایبی چون دوره‌های سرویس کوتاه، قیمت بالای قطعات یدکی و تأثیرپذیری از هیدروژن محیط را دارند.

با توجه به رژیم شیمیایی نیروگاه، اکسیژن محلول در بخش‌های خاصی مانند خروجی Deaerator ها باید در غلظت مشخصی حفظ شود. به‌عنوان مثال در رژیم شیمیایی AVT [2] (R) غلظت اکسیژن باید کمتر از 5 ppb باشد. ازاین‌رو می‌توان از تجهیزات متفاوتی برای اندازه‌گیری اکسیژن محلول استفاده کرد.

با توجه به اینکه اندازه‌گیری اکسیژن محلول به شکل آنلاین از دو روش لومینسانس و الکتروشیمیایی امکان‌پذیر است، متناسب با غلظت اکسیژن محلول در نمونه می‌توان از هر دو روش استفاده کرد. حد تشخیص اندازه‌گیری در روش‌های الکتروشیمایی پایین‌تر

1 luminescence sensor
2 All-volatile treatment

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

(بهتر) از روش‌های لومینسانس است. بدین‌ترتیب در نیروگاه‌هایی با رژیم شیمیایی AVT (R) به‌کارگیری حسگر اکسیژن الکتروشیمیایی الزامی است.

۳-۵- حسگر القایی در صنعت برق

حسگرهای القایی، حسگرهای بدون تماس هستند که تنها در مقابل فلزات عکس‌العمل نشان می‌دهند و می‌توانند فرمان مستقیم به رله‌ها، شیرهای برقی، سیستم‌های اندازه‌گیری و مدارات کنترل الکترونیکی (مانند PLC[1]) ارسال کنند. این حسگرها اساساً بر مبنای مدارهای مغناطیسی بنا نهاده شده‌اند، ازاین‌رو به آنها حسگرهای الکترومغناطیسی نیز می‌گویند.



شکل ۳-۴ اجزای حسگر القایی [۹۹]

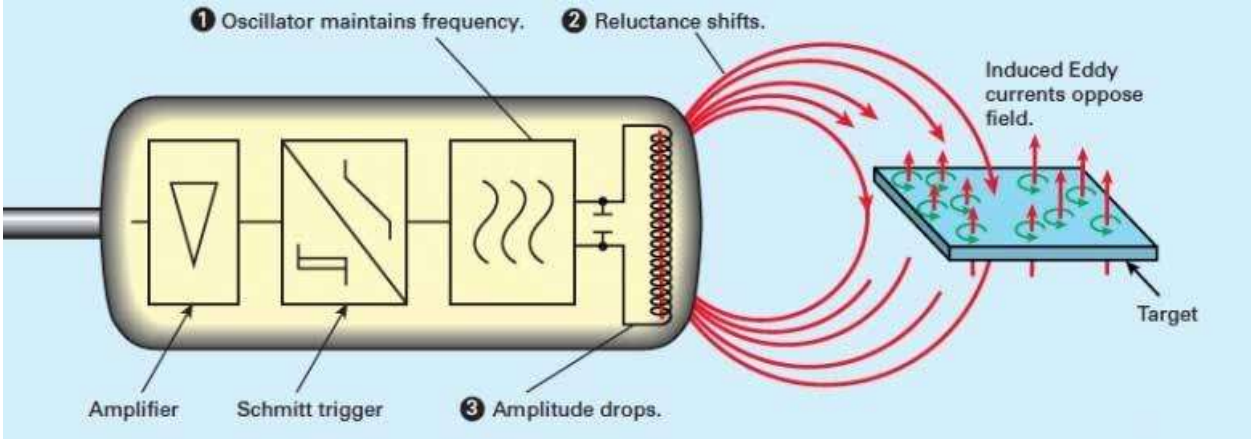
۳-۵-۱- ساختمان حسگرهای القایی و اساس کار آنها

ساختمان این حسگرها از سه طبقه تشکیل می‌شود: اسیلاتور، اشمیت تریگر، تقویت خروجی. قسمت اساسی این حسگرها از اسیلاتور با فرکانس بالا تشکیل یافته که می‌تواند توسط قطعات فلزی تحت تأثیر قرار گیرد. این اسیلاتور باعث به‌وجود آمدن میدان

1 Programmable logic controller

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

الکترومغناطیسی در قسمت حساس حسگر می‌شود. نزدیک شدن یک قطعه فلزی باعث به‌وجود آمدن جریان‌های گردابی در قطعه شده و این عمل سبب جذب انرژی میدان می‌شود و در نتیجه دامنه اسیلاتور کاهش می‌یابد. ازآنجاکه طبقه دمدولاتور آشکارساز دامنه اسیلاتور است در نتیجه، کاهش دامنه اسیلاتور توسط این قسمت به طبقه اشمیت تریگر منتقل می‌شود. کاهش دامنه اسیلاتور باعث فعال شدن خروجی اشمیت تریگر شده و این قسمت نیز به نوبه خود باعث تحریک طبقه خروجی می‌شود.



شکل ۳-۵ نحوه کارکرد حسگرهای القایی [۹۹]

۳-۵-۲- مزایای حسگر القایی

- سرعت سوئیچینگ زیاد:

برخی ازحسگرهای القایی، با سرعت سوئیچینگ تا KHz ۲۵ کار می‌کنند.

- طول عمر زیاد:

به دلیل نداشتن کنتاکت مکانیکی و عدم نفوذ آب، روغن، گرد و غبار و ...

- عدم نیاز به نیرو و فشار:

با توجه به عملکرد حسگر هنگام نزدیک شدن قطعه، به نیرو و فشار نیازی نیست.

- قابل‌استفاده در محیط‌های مختلف با شرایط سخت کاری:

در محیط‌های با فشار زیاد، دمای بالا، اسیدی، روغنی، آب و ... قابل‌استفاده هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- عدم ایجاد نویز در هنگام سوئیچینگ:

به دلیل استفاده از نیمه‌هادی‌ها در طبقه خروجی، نویزهای مزاحم ایجاد نمی‌شود.

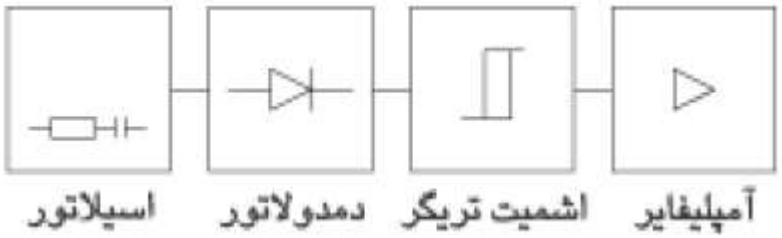
۳-۵-۳- کاربرد حسگر القایی در کنترل صنعتی و نیروگاه

- اندازه‌گیری فاصه از قطعه.
- جداسازی قطعات با ابعاد مختلف.
- اندازه‌گیری ضخامت قطعات فلزی
- تشخیص قطعات فلزی شکسته و خورده‌شده در دستگاه‌های مختلف
- جداسازی قسمت فلزی قطعات
- آشکارسازی هر گونه تغییر در دندانه چرخ‌دنده‌های فلزی به‌ویژه توربین‌های نیروگاهی
- اندازه‌گیری و کنترل سرعت و آشکارسازی حرکت‌های مکانیکی مانند حرکت پمپ‌ها و غیره

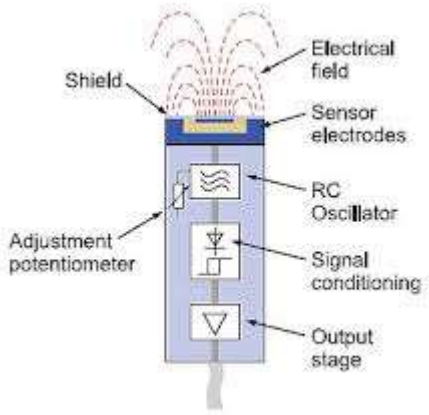
۳-۶- حسگر خازنی در صنعت برق

حسگرهای خازنی حسگرهای بدون تماس و بدون کنتاکت الکتریکی هستند که در مقابل فلزات و اغلب غیر فلزات عمل می‌کنند. این حسگرها برای کنترل سطوح در مخازنی که از مواد پودری، مایع و با دانه دانه پر شده‌اند مناسب هستند. همچنین از آنها می‌توان به‌عنوان مولد پالس به‌منظور کنترل وضعیت برنامه ماشین‌آلات برای شمارنده‌ها و آشکارسازی تقریباً تمام مواد فلزی و غیر فلزی استفاده کرد.

ساختمان اساسی این حسگرها از چهار قسمت تشکیل شده است:



DOI: 10.30503/nripress.2020.144



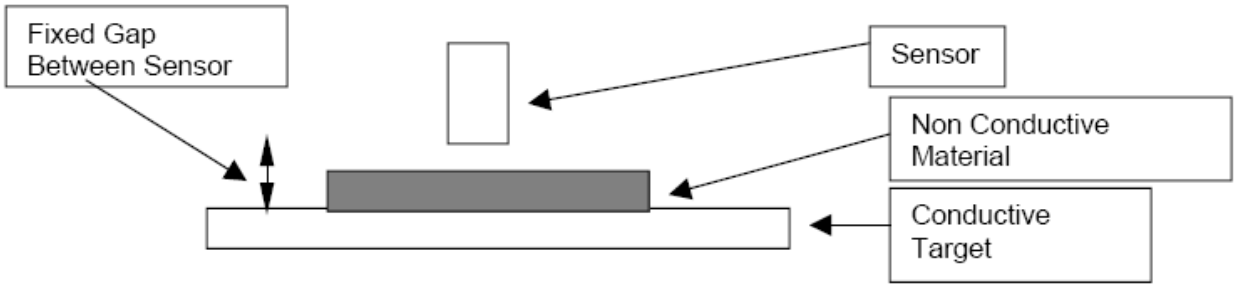
شکل ۳-۶ شماتیک و اجزای حسگر خازنی [۱۰۰]

قسمت اساسی اسیلاتور از دو قطعه فلزی تشکیل شده است. وضعیت قرارگیری این قطعات فلزی نسبت به هم طوری است که باعث ایجاد یک ظرفیت خازنی می‌شود. هرگاه قطعه‌ای با ضریب الکتریکی E. به صفحه حساس نزدیک شود موجب تغییر ظرفیت خازنی بین صفحات می‌شود. این تغییر ظرفیت خازنی باعث تغییر دامنه خروجی اسیلاتور می‌گردد.

دمدولاتور دامنه اسیلاتور را آشکار می‌کند و این مقدار را با سطح مرجع مقایسه می‌نماید. هرگاه دامنه‌ی این مقدار از دامنه‌ی مرجع بیشتر باشد، خروجی حسگر تحریک می‌شود. آمپلی‌فایر خروجی وظیفه تأمین جریان بار را به عهده دارد.

این نوع حسگر کاربردهای ویژه‌ای اعم از شمارشگر تعداد در تولید محصولات قابل‌شمارش، کنترل فاصله هد از سطح و اندازه‌گیری مواد عایق بر روی یک سطح را دارد. بدین‌منظور در نیروگاه‌های حرارتی برای اندازه‌گیری عایق برخی سطوح از این نوع حسگر استفاده می‌شود. در این روش دو صفحه خازن ثابت هستند و دی‌الکتریک بین آنها تغییر می‌کند. ازآنجایی‌که تغییر ظرفیت، متناسب با تغییر ضخامت عایق بین صفحات است، از این روش می‌توان برای تعیین ضخامت مواد عایق مانند شکل ۳-۷ استفاده کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۳-۷ تعیین ضخامت مواد عایق توسط حسگر خازنی [۱۰۰]

در روش‌های دیگر، حسگر نسبت به تغییر جنس ماده عایق بین صفحات، واکنش بیشتری نشان می‌دهد که این روش بیشتر برای کنترل کیفیت مواد ساخته‌شده به‌کار می‌رود. لازم به ذکر است در این نوع استفاده حسگر نسبت به کیفیت ماده عایق کالیبره شده است. در نهایت با توجه به‌کاربردهای فوق، متداول‌ترین روش استفاده از حسگرهای خازنی، تغییر فاصله بین صفحات آن است که بیشتر برای اندازه‌گیری نیرو، فشار یا هر تنش دیگری به‌کار می‌رود. روش‌های دیگر بر اساس تغییر سطح مشترک صفحات خازن و یا ماده دی‌الکتریک بین صفحات به‌کار می‌روند [۱۰۰].

۳-۷- حسگر مغناطیسی[1] در صنعت برق

حسگر مغناطیسی و یا به عبارتی «حسگر آهنربا» و یا در «اصطلاح بازاری حسگر جک» یکی از انواع حسگر مجاورتی است. اساس کار حسگر مغناطیسی واکنش به میدان مغناطیسی اطراف آهنربای دائم یا الکتریکی است.

این حسگرها غالباً برای تشخیص موقعیت قطعه بدون تماس با حسگر موردکاربرد قرار می‌گیرند. در حقیقت بدون انجام هیچ‌گونه تماسی با قطعات، می‌توانند موقعیت آنها را تشخیص دهند. جنس این حسگرها از آهنربای دائمی است که از جریان‌های AC و یا DC استفاده می‌کنند. نحوه عملکرد آنها به‌گونه‌ای است که توسط میدان مغناطیسی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و ویژگی‌شان تغییر می‌کند.

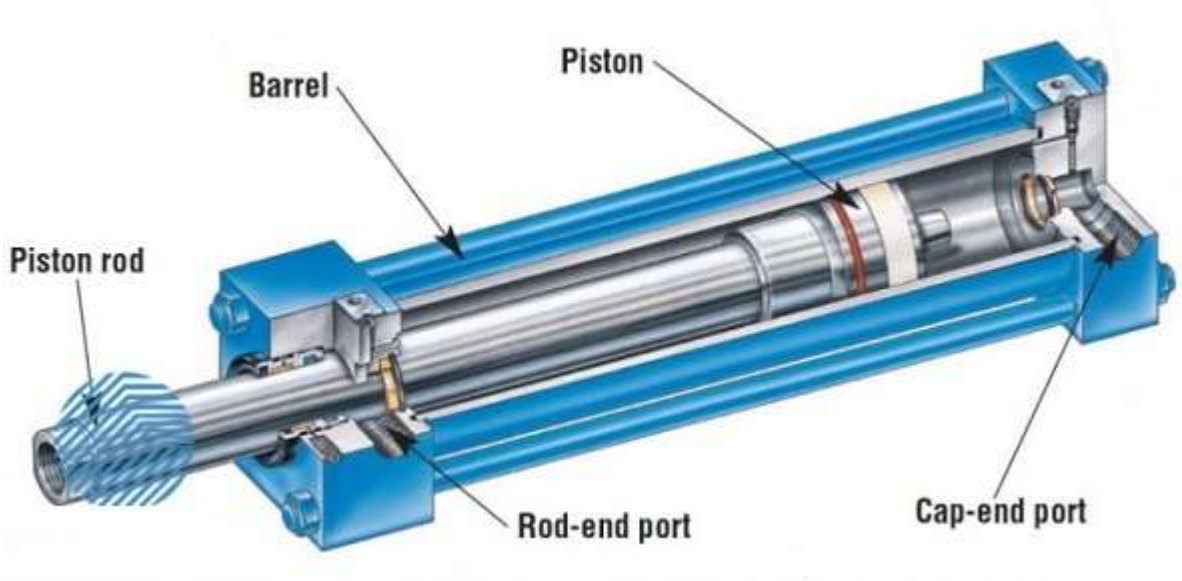
1 Magnetic sensor

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

در حالت کلی زمانی که قصد اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی مانند جهت، حضور یا عدم حضور و یا جریان را اندازه‌گیری کنید و قصد استفاده از حسگرهای مغناطیسی باشد، نخست باید این کمیت‌ها یک میدان مغناطیسی را به‌وجود آورند و یا تغییری در میدان مغناطیسی حسگر ایجاد کنند، تا این حسگر این تغییر را احساس کرده و آن را توسط یک مدار به جریان و یا ولتاژ مناسب تغییر دهد.

۳-۷-۱- حسگر شدت میدان مغناطیسی چه کاربردی دارند؟

حسگر شدت میدان مغناطیسی همان حسگر جک است و یکی از کاربردهای فراوان آن در جک‌های هیدرولیکی است. این حسگرها با نصب بر روی جک‌های پنیوماتیکی، می‌توانند موقعیت جک را یا به عبارتی حالت باز یا بسته بودن جک را تشخیص دهند. با قرار گرفتن این حسگر در شیار موجود در پیستون، پیستون جک دارای یک قسمت یا یک حلقه مغناطیسی است و زمانی که جک به حسگر نزدیک می‌شود، حسگر سیگنالی را ارسال می‌کند، بر این اساس که جک به انتهای مخزن نزدیک شده و باید عملیات دیگر شروع شود و یا سرعت کم شود.



شکل ۳-۸ اجزای حسگر مغناطیسی [۱۰۱]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۷-۲- کاربردهای حسگر آهنربا چیست؟

حسگر مغناطیسی حدود ۲۰۰۰ سال است که مورداستفاده وکاربرد قرار می‌گیرند. این حسگرها در مقابل مغناطیس (آهنربا) حساس می‌باشد، یکی از کاربردهای آن در رهیابی و ناوبری می‌باشد.

از دیگر کاربردهای آن به کنترل سطوح در مخازن نیز می‌توان اشاره کرد. به این صورت که حسگرهای آهنربا در یک یا چند نقطه مشخص در مخازن به‌صورت عمودی بدون نیاز به منبع تغذیه در مخزن نصب می‌شود. این حسگر دارای شناوری از جنس پلی‌آمید (یا حتی فلز) است که در سطح مایعات موجود در مخزن قرار می‌گیرد و به همراه مایع جابه‌جا می‌شود. حرکت شناور در طول میله باعث تحریک سوئیچ‌های داخل میله می‌گردد و خروجی دستگاه را فعال می‌کند. در حقیقت آن شناورها همان آهنربا هستند و زمانی که این آهنربا در مقابل حسگر مغناطیسی قرار می‌گیرد باعث فعال شدن آن و ایجاد سیگنال می‌شود. به این نوع کنترلر سطح (لول‌سوئیچ یا فلوسوئیچ) می‌گویند لول‌سوئیچ‌ها از نظر شکل ظاهری و نوع نصب تنوع زیادی دارند.

در حالت کلی اگر که امکان نصب یک میدان مغناطیسی دائمی (آهنربای دائم) و یا میدان مغناطیسی الکتریکی بر روی تجهیزات باشد، می‌توان از حسگر مغناطیسی در بسیاری از کاربردها استفاده کرد، در این قسمت به مواردی از آنها اشاره می‌کنیم:

حسگر آهنربا توانایی شمارش وسایل را دارند.

این حسگرها می‌توانند باز یا بسته بودن درب‌ها را تشخیص دهند.

از این حسگرها برای کنترل موقعیت تجهیزات نیز استفاده می‌کنند.

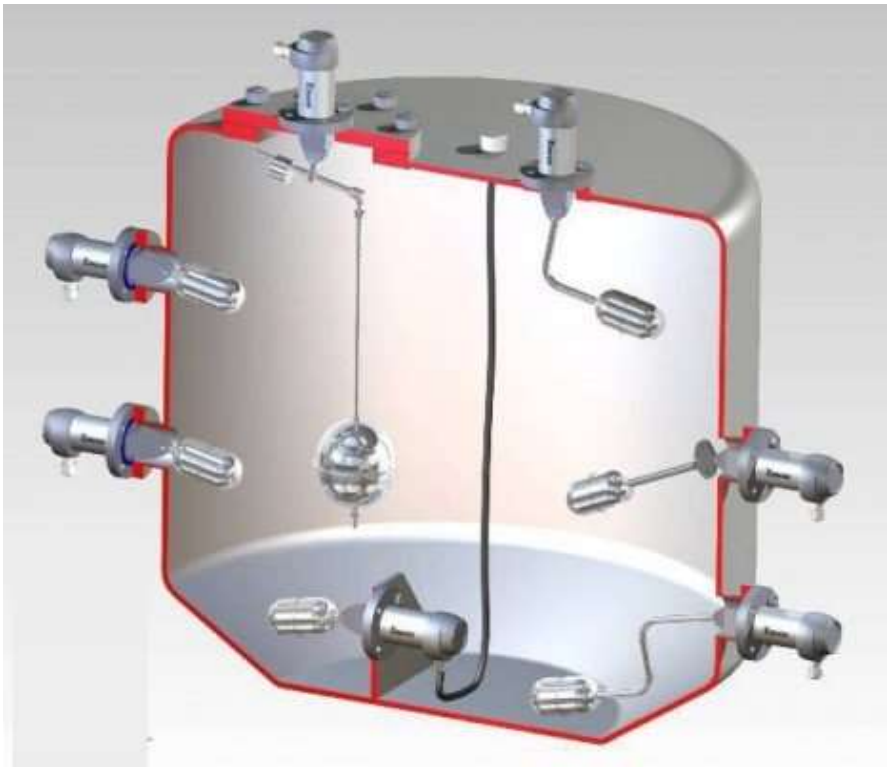
حسگرهای آهنربا برای اندازه‌گیری سرعت چرخش مورداستفاده قرار می‌گیرند (به این نوع حسگرها اصطلاحاً حسگر پیک‌آپ گویند).

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۷-۳- لول‌سوئیچ یا فلوسوئیچ چیست و چه کاربردی دارد؟

لول‌سوئیچ‌ها[1]و یا فلوسوئیچ‌ها[2] نوعی وسیله، برای اندازه‌گیری سطح موادی از کف مخازن تا بالای سطح آنها است. لول‌سوئیچ و یا به عبارت دیگرکنترلر سطح، برای کنترل سطح مخازن موردکاربرد واقع می‌شود. اغلب از مکانیزم‌های مکانیکی و ساده استفاده می‌کنند و با توجه به نوع مواد داخل مخزن اعم از مایعات یا مواد پودری می‌تواند از مدل‌های خازنی یا راداری آن استفاده کرد.

مکانیزم اصلی لول‌سوئیچ تعیین مقدار مواد، تنظیم و کنترل قطع و وصل خروجی در ست‌پوینت یا نقطه تنظیم است. این وسیله توانایی سنجش ارتفاع موادی همچون: بنزین، مخازن آب، سیلوها، مایعات و جامدات در صنایع متعدد مانند: صنایع غذایی، صنایع دارویی، آب و فاضلاب، نفت و گاز، فولاد و سیمان و ... را دارد [۱۰۱].



شکل ۳-۹ نوع کاربرد لول‌سوئیچ و فلوسوئیچ [۱۰۱]

1 Level Switch
2 Flow switch

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۸- آنالیزورهای گاز در نیروگاه‌ها

در تمامی فرایندهای شیمیایی، پتروشیمی، پالایشگاهی و نیروگاهی، پایش و مهار فرایند و مقادیر گازهای خروجی از استک، بدون سیستم‌های آنالایزر ترکیبات شیمیایی امکان‌پذیر نیست. کنترل فرایند، بهبود کیفیت فراورده، حفظ محیط زیست و ایمنی فرایندها با سیستم‌های آنالایزر به‌دست می‌آید. امروزه سیستم مانیتورینگ و پایش مداوم آلاینده‌های خروجی از دودکش مراکز صنعتی و تولیدی مطابق با استانداردهای بین‌المللی TUV و MCERT جزو یکی از الزامات مراکز زیست‌محیطی به‌شمار می‌آید [۱۰۲].

۳-۸-۱- آنالایزرهای ثابت

اندازه‌گیری میزان گازهای خروجی از دودکش به دلایل متعددی از جمله پاسخ به الزامات قانونی، ملاحظات ایمنی، مانیتورینگ فرایند و کاهش هزینه‌ها انجام می‌شود. استفاده صحیح از سیستم‌های پایش آنلاین افزون بر برآورده کردن الزامات قانونی باعث کنترل محصولات، افزایش راندمان و بهره‌وری و اقتصادی شدن تولید خواهد شد.

۳ ۸ ۱ ۱ سیستم‌های in situ

این روش جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش برای آنالیز و مانیتورینگ گازهای خروجی دودکش است.

در این روش، آینه‌ای در انتهای پراب بسته (Envelope Folded Beam) قرار داده شده است که این پراب محافظ میکرونی برای ورود (Permit) گاز دارد. بدین‌ترتیب اشعه ارسال‌شده توسط فرستنده پس از عبور از گاز درون پراب بسته، توسط آینه انتهایی بازتاب و در گیرنده مورداندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

۳ ۸ ۱ ۲ مزایا

- جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش آنالیز
- عدم نیاز به سیستم‌های پرهزینه و پیچیده نمونه‌گیری
- قابلیت کالیبراسیون اتوماتیک سیستم
- Purging زمان‌بندی‌شده لنز، آینه و محافظ پراب و عدم نیاز به استفاده مداوم از هوای ابزار دقیق

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- به دلیل نصب شدن آنالایزر In-Situ روی دودکش، این تجهیزات همواره به همراه سیستم کنترل و مانیتورینگ مجزا ارائه می‌شوند که در پای دودکش، اتاق کنترل و یا هر مکان دیگری قابل‌نصب بوده و همه موارد اپراتوری از قبیل کالیبراسیون، عیب‌یابی، گزارش‌دهی و غیره توسط آن قابل‌انجام است و نیازی به مراجعه اپراتور به بالای دودکش به‌منظور انجام این امور نیست.

۳-۸-۲- سیستم‌های extractive

استفاده از سیستم‌های پایش آنلاین Extractive به‌منظور آنالیز گازهای خروجی از دودکش و سایر پروسه‌ها از دیرباز معمول بوده است. در این سیستم‌ها گاز خروجی از دودکش از طریق یک نقطه نمونه‌گیری از دودکش خارج شده و به آنالایزر رسانده می‌شود. انتقال گاز از دودکش به آنالایزر از طریق مسیر نمونه‌گیری یا Sample line انجام شده و گاز نمونه پیش از ورود به آنالایزر از بخش‌های مختلف سیستم آماده‌سازی نمونه عبور می‌کند. پس از عبور گاز از بخش‌های گفته‌شده، نمونه در معرض حسگرها قرار گرفته و غلظت گازهای موردنظر را اندازه‌گیری می‌کنند.

۳-۸-۳- آنالایزرهای پرتابل

آنالایزرهای پرتابل گاز غالباً برای اندازه‌گیری دوره‌ای گازهای خروجی از پروسه و بررسی کیفی آن به‌کار می‌روند. این تجهیزات با وزن کم و قابلیت حمل آسان وسیله‌ای ایدئال برای اندازه‌گیری در پروسه‌هایی هستند که نیازمند مانیتورینگ دائم نیستند.کمپانی ECOM آلمان و Protea انگلستان دامنه‌ی وسیعی از آنالایزرهای پرتابل گاز را برای کاربردهای مختلف ارائه می‌دهند.

کمپانی پروتیا (protea) انگلستان با بیش از ۲۵ سال سابقه به‌عنوان یکی از کمپانی‌های پیشرو در تولد سیستم‌های انالایز آنلاین گازهای حاصل از احتراق، گازهای پروسس و هوای محیطی در جهان شناخته شده است که با بهره‌گیری از دانش عمیق سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل، ارائه‌دهنده راه حل‌های پیشرفته در این زمینه‌ها برای اکثر پروژه‌های صنعتی است.

۱ ۳ ۸ ۳ آنالایزرهای پرتابل کمپانی Ecom

شرکت فراز تجهیز جم با در اختیار داشتن نمایندگی انحصاری کمپانی ECOM آلمان رنج وسیعی از آنالایزرهای پرتابل گاز را برای کاربردهای مختلف ارائه می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

این آنالایزرها با قابلیت اندازه‌گیری گازهای O2، CO، CO2، NOx، SO2، NH3، HCl و غیره و همچنین H2S با استفاده از حسگرهای الکتروشیمیایی و IR و سیستم Sample conditioning منحصربه‌فرد برای اندازه‌گیری گاز در بسیاری از فرایندهای صنعتی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

همچنین این تجهیزات قابلیت محاسبه پارامترهایی مانند Excess air، Losses، Efficiency، Dew point و غیره را نیز دارند.

سایر پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری توسط این تجهیزات عبارت‌اند از:

- Air temperature
- Gas temperature
- Pressure
- Differential pressure
- Internal flow
- Internal air pressure
- Soot measurement

تجهیزات این کمپانی، در صنایع نیروگاهی، فولادی، خودروسازی، کارخانه‌های سازنده بویلر و بسیاری صنایع دیگر کاربرد دارد.

۲ ۳ ۸ ۳ آنالایزرهای پرتابل کمپانی Protea

این آنالایزرها با بهره‌گیری از آخرین تکنولوژی‌های به‌روز دنیا قابلیت اندازه‌گیری چندین گاز را به‌صورت همزمان داشته و راهکاری مناسب برای کاهش هزینه‌ها در صنایع مختلف است.

این آنالایزر با بهره‌گیری از اسپکتوفتومتر، قابلیت اندازه‌گیری با دقت بالا را دارد و همچنین امکان تغییر دقت به‌منظور کاربردهای مختلف نیز وجود دارد:

- امکان اندازه‌گیری ۱۰۰۰ گاز در یک دستگاه
- امکان دانلود دیتا و بررسی و انالیز به‌صورت Off-Line
- دارای حسگر O2 داخلی، فیلتر ورودی heated و کنترل نمونه

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- بررسی گازهای خروجی دودکش
- مانیتورینگ زباله سوزها و گازهای ناشی از احتراق
- اندازه‌گیری با دقت بالا
- مانیتورینگ هوای محیط



شکل ۳-۱۰ نمونه‌ای از آنالایزر پرتابل

۳-۹- حسگر سنجش pH

به درصد اسیدی بودن و قلیایی بودن آب، محصولات و محیط pH گفته می‌شود و برای اندازه‌گیری میزان PH از حسگر اندازه‌گیری PH استفاده می‌شود.

PH از کلمه فرانسوی Hydro gene گرفته شده است و اصطلاح آن مخفف دو کلمهHydrogen و Power است. PH قدرت هیدروژنی آب و درصد اسید موجود در آن را اندازه‌گیری می‌کند.

حسگر اندازه‌گیری PH وسیله‌ای است که از آن برای اندازه‌گیری قدرت هیدروژن و تعیین میزان اسیدی یا قلیایی بودن محصولات و محیط استفاده می‌شود. این حسگر در صنایع مختلفی مورداستفاده قرار می‌گیرد و کارایی زیادی دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

میزان اسیدی بودن یا قلیایی بودن یک محیط در انجام واکنش‌های شیمیایی و فرایندی که در آن محیط انجام می‌شود، تأثیر زیادی دارد. بنابراین استفاده از حسگر اندازه‌گیری PH در اکثر صنایع الزامی است و محصولی کاربردی برای کنترل محیط و گرفتن نتیجه‌ای عالی در پایان فرایند به‌شمار می‌آید.

حسگرهای اندازه‌گیری PH عمری طولانی دارند و از دقت بالایی برخوردار هستند. نگهداری از این حسگرها بسیار راحت و کم هزینه است. حسگرهای اندازه‌گیری PH دستگاه‌هایی پیشرفته با حساسیت بسیار بالا هستند. البته نوع معمولی این حسگرها نیز وجود دارد که برای محیط‌های کوچک‌تر استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۱ نمونه‌ای از دستگاه pH متر و نوع کارکرد [۱۰۳]

۳-۹-۱- کاربردهای حسگر اندازه گیری PH

حسگر اندازه‌گیری PH اهمیت بالایی دارد و از آن در صنایع زیادی استفاده می‌شود. این حسگر روی سرعت واکنش‌های شیمیایی تأثیر می‌گذارد و میزان اسیدی بودن یا قلیایی بودن محصولات و محلول‌ها را نیز اندازه‌گیری می‌کند. در زیر برخی از این صنایع را نام برده‌ایم:

- آب و فاضلاب
- نیروگاه‌ها
- پالایشگاه‌ها
- صنایع نفت و گاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

- صنایع غذایی
- صنایع کشاورزی
- صنایع دارویی
- صنایع دامپروری
- تصفیه خانه فاضلاب صنعتی و خانگی
- آزمایشگاه‌های صنعتی و پزشکی
- صنایعی که اندازه‌گیری میزان اسید در آنها اهمیت دارد

۳-۹-۲- اجزای تشکیل‌دهنده حسگر اندازه‌گیری PH

حسگر اندازه گیری PH دستگاه پیچیده‌ای نیست و از اجزای خیلی کمی تشکیل شده است که عبارت‌اند از:

- الکترود
- مبدل
- نمایشگر
- کابل
- کنترل‌کننده

۳-۹-۳- انواع حسگر اندازه‌گیری PH

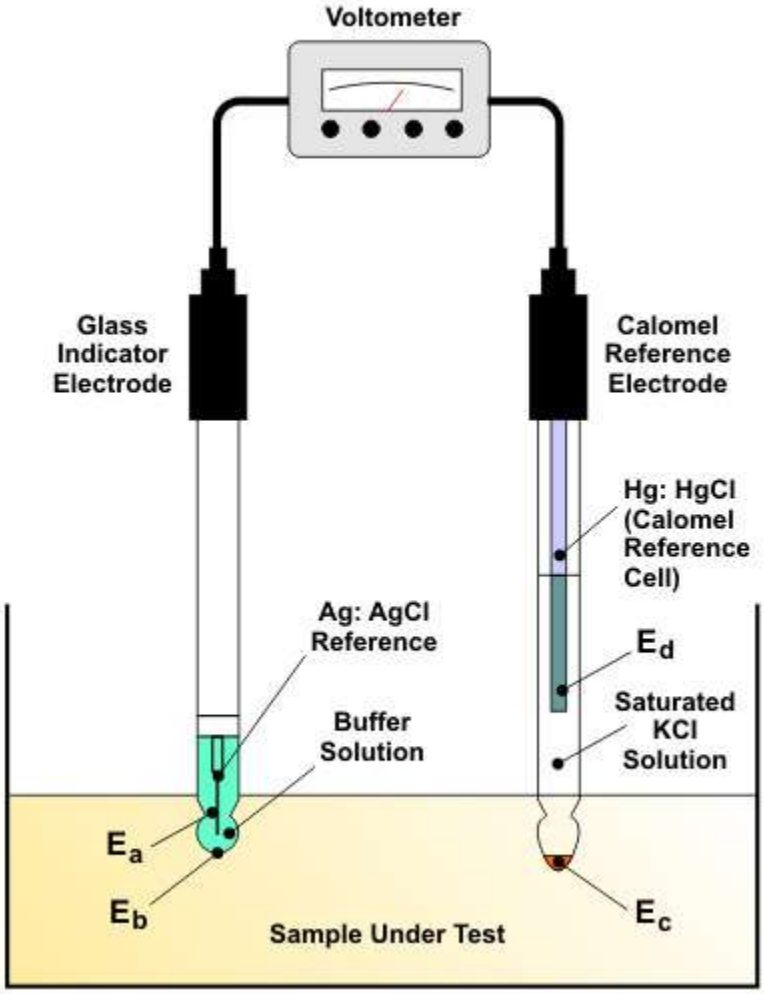
حسگر اندازه‌گیری PH ۲ مدل خیلی رایج دارد که در اکثر صنایع از آنها استفاده می‌شود. این ۲ مدل عبارت‌اند از حسگر اندازه‌گیری PH پرتابل و حسگر اندازه‌گیری PH قابل‌نصب ثابت.

– حسگر اندازه‌گیری PH پرتابل: از این مدل حسگر بیشتر در آزمایشگاه‌های صنعتی و پزشکی استفاده می‌شود.

– حسگر اندازه‌گیری PH قابل‌نصب ثابت: از این حسگر بیشتر در صنایعی استفاده می‌شود که میزان PH باید به‌صورت پیوسته بررسی و اعلام شود. این حسگر همزمان که میزان PH را اندازه‌گیری می‌کند، آن را روی یک مانیتور و نمایشگر نشان می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

از حسگر اندازه‌گیری PH در صنایع و محیط‌های زیادی استفاده می‌شود. این دستگاه مزایای زیادی دارد و باعث بالا رفتن کیفیت نهایی کار می‌شود. حسگر اندازه‌گیری PH میزان اسیدی بودن و قلیایی بودن یک محیط را اندازه‌گیری می‌کند و به انجام هرچه بهتر و سریع‌تر واکنش‌های شیمیایی کمک می‌کند [۱۰۳].



شکل ۳-۱۲ حسگر اندازه‌گیری pH [۱۰۳]

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۰- حسگر سنجش هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی یا رسانایی الکتریکی که به آن کنداکتیویمتر هم گفته می‌شود یکی از معیارهای سنجش کیفیت آب است و توسط ابزاری به نام EC متر یا آنالایزر EC حسگر رسانایی الکتریکی‌سنج سنجیده می‌شود. با توجه به اینکه هدایت الکتریکی رابطه مستقیمی با TDS و نمک‌های محلول در آب دارد، بنابراین اندازه‌گیری آن به‌منظور کنترل کیفیت آب از اهمیت زیادی برخوردار است. با استفاده از حسگر EC متر مواد معدنی، آلی، نمک و یا ناخالصی‌های آب اندازه‌گیری می‌شود که این میزان برای شرب، آب ورودی در صنایع و بالاخص چرخه خنک‌سازی نیروگاه‌های حرارتی، آبیاری گل و گیاهان و ماهیان آکواریومی بسیار مهم و ضروری است. معمولاً EC آب خام ورودی به دستگاه تصفیه آب و EC آب خروجی از آن توسط این حسگر اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۱۰-۱- کارکرد دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی EC

حسگرهای سنجش هدایت الکتریکی معمولاً شامل ۴ عدد الکترون از جنس پلاتین و به شکل استوانه‌ای است. جریان متناوب به جفت الکترودهای بیرونی اعمال شده و پتانسیل بین جفت الکترودهای داخلی اندازه‌گیری می‌شود.

با توجه به‌کاربرد و محل استفاده آنها انواع مختلفی هدایت‌سنج وجود دارد.

از رایج‌ترین EC مترهای موجود در بازار می‌توان به EC متر پرتابل، EC متر قلمی، EC متر رومیزی و EC متر به همراه Transmitter اشاره کرد که هر کدام از آنها دارای مزیت و محدودیت‌هایی هستند. انواع قلمی و پرتابل طوری طراحی شده‌اند که برای استفاده در محیط خارج از آزمایشگاه مناسب باشند. نوع رومیزی قابل‌حمل به خارج از آزمایشگاه نیست، معمولاً با برق شهری کار می‌کند و علاوه بر هدایت الکتریکی قابلیت اندازه‌گیری میزان شوری (TDS)، مقاومت الکتریکی، PH، دما و NaCl موجود را دارد. کالیبراسون اتوماتیک، کالیبراسیون چندنقطه‌ای و قابلیت ذخیره‌ی اطلاعات امکانات دیگری است که امروزه بیشتر تولیدکنندگان روی دستگاه‌ها قرار می‌دهند.

از طرفی، دما تأثیر بسیار زیادی روی رسانایی دارد. بنابراین مهم است که حسگر EC متر در دمایی که کالیبره شده است کار کند برای این منظور از جبران‌سازهای دمایی استفاده می‌شود. بیشترین کاربرد دستگاه ECمتر برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب تصفیه‌شده توسط دستگاه تصفیه آب است [۱۰۴].

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۳-۱۳ حسگر اندازه‌گیری هدایت الکتریکی [۱۰۴]

۳-۱۱- حسگر سنجش سدیم

در نیروگاه‌ها به‌ویژه نیروگاه حرارتی، بررسی پایش و کنترل ناخالصی‌های یونی در بخارات آب استفاده‌شده در فرایند تولید نیرو شامل آب خام، آب دیگ بخار، بخار و آب خنک‌کن ضروری است. حضور گونه‌های یونی خورنده مانند سدیم، کلرید و سولفات در سیکل بخار آب حتی به میزان بسیار ناچیز در حدود میلی‌گرم بر لیتر و حتی مقادیر بسیار پایین‌تر می‌تواند سبب خوردگی تجهیزات نیروگاهی از قبیل لوله‌های دیگ بخار، ژنراتورهای بخار و پره‌های توربین‌ها شود. پایش ناخالصی‌های یونی در طول فرایند تولید نیرو اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با منشأ آلودگی و سرعت خوردگی در تجهیزات نیروگاه‌ها فراهم می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد نزدیک به ۶۰٪ از خاموشی در نیروگاه‌ها ناشی از حضور ناخالصی در آب (عدم نمونه‌برداری صحیح) و یا مشکلات آنالیز شیمیایی (عدم اندازه‌گیری صحیح) است. ازاین‌رو، علاوه بر به‌کارگیری طراحی اولیه مناسب در سیستم نمونه‌برداری نیروگاه، به‌کارگیری تجهیزات آنالیز دقیق اهمیت بسیار زیادی دارد.

روش استاندارد تعیین مقدار سدیم در آب بر اساس ASTM D4191 و با به‌کارگیری دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی انجام می‌شود. در گذشته با استفاده از الکترودهای یون گزین سدیم و بافر آمونیوم یا دی‌ایزوپروپیل آمین این امکان فراهم می‌شد. در روش‌های نوین بر اساس حسگر الکتروشیمیایی الکترودهای با غشای پلیمری نیازی به استفاده از بافر ندارند و حدود تشخیص کمتر

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

از ۱ میکروگرم بر لیتر دارند. افزون‌براین سدیم با روش کروماتوگرافی یونی نیز قابل‌اندازه‌گیری است. این اندازه‌گیری با دستگاه Alert Ion Analyzer امکان‌پذیر است.

۳-۱۲- حسگر سنجش اکسیژن

اکسیژن محلول در آب موجب خوردگی حفره‌ای (PITTING) قبل از دیگ بخار، در دیگ بخار و بعد از دیگ بخار می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد نزدیک به ۶۰٪ از خاموشی در نیروگاه‌ها ناشی از حضور ناخالصی در آب (عدم نمونه‌برداری صحیح) و یا مشکلات آنالیز شیمیایی (عدم اندازه‌گیری صحیح) است. ازاین‌رو بررسی مقدار اکسیژن محلول در آب و جداسازی آن، برای نیروگاه بخار بسیار حیاتی است. میزان مجاز اکسیژن محلول متناسب با رژیم شیمیایی به‌کاررفته در نیروگاه است. به همین دلیل متناسب با غلظت اکسیژن در نمونه، می‌توان از فناوری‌های متفاوت برای اندازه‌گیری و پایش استفاده کرد. میزان اکسیژن محلول در آب دیگ بخار باید کمتر از 007/0 ppm باشد، بدین‌ترتیب اندازه‌گیری این پارامتر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

۳-۱۲-۱- سنجش میزان اکسیژن محلول در آب (تیتراسیون با معرف رنگی)

روش مرجع تعیین میزان اکسیژن محلول در آب مطابق با استاندارد ASTM D888 انجام می‌شود. اندازه‌گیری اکسیژن محلول با این استاندارد به سه روش انجام می‌گیرد که بستگی به غلظت اکسیژن محلول دارد. در روش A مقادیر بالای اکسیژن محلول (بیش از 1 ppm) با روش تیتراسیون یدومتری انجام می‌شوند. روش B برای اندازه‌گیری الکتروشیمیایی و با استفاده از حسگر اکسیژن حل‌شده در محدوده غلظتی ۰/۰۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر مناسب است و روش C نیز برای اندازه‌گیری این محدوده غلظتی با پروب دستگاهی لومینسانس است.

روش ASTM D5543 برای اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم اکسیژن محلول در سیکل آب–بخار نیروگاه بسیار مناسب است و اکسیژن محلول را در محدوده ۰ تا ۱۰۰ میکرو گرم در لیتر (ppb) اندازه‌گیری می‌کند و اساس آن تغییر رنگ است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۲-۲- روش‌های نوین سنجش میزان اکسیژن

۳ ۱۲ ۲ ۱ حسگر گازی نوین برخط و در محل قابل‌نصب بر روی خط

شرکت ترموآکواحسگرز حسگرهای متنوعی را برای سنجش برخط اکسیژن محلول ارائه می‌دهد. نحوه کار این حسگرها (شکل ۳-۱۴) به این صورت است که به یک کامپیوتر متصل شده و اطلاعات موردنیاز را به‌صورت منظم و در فواصل زمانی مشخص ثبت می‌کند. این حسگرها بر اساس فناوری سل کلارک طراحی شده‌اند که شامل الکترود رفرنس نقره، آند نقره و کاتد طلا هستند. این حسگرها دارای غشاء کاملاً پایدار بوده و حسگری برای ثبت مستقل دما دارند. از کاربردهای عمده این پروب‌ها می‌توان به استفاده در نیروگاه‌ها و آب دیگ بخار، کنترل کیفیت آب فوق خالص، صنایع دارویی و غیره اشاره شود که می‌توانند اکسیژن محلول را در محدوده غلظتی اندازه‌گیری کنند.



شکل ۳-۱۴حسگر سنجش گاز اکسیژن [۱۰۵]

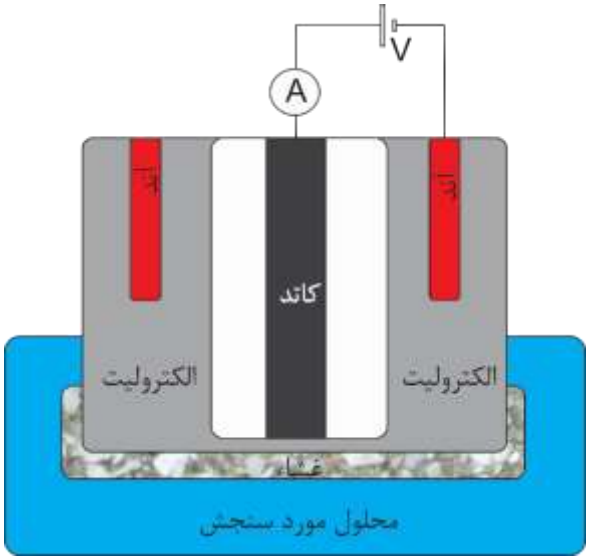
شرکت Mettler Toledo دو نوع حسگر با کارایی بالا برای اندازه‌گیری میزان اکسیژن محلول عرضه می‌کند که عبارت‌اند از: حسگرهای پلاروگرافی و نوری .

۳ ۱۲ ۲ ۲ حسگرهای پلاروگرافی تعیین میزان اکسیژن محلول

این حسگرها (شکل۳- ۵) از نوع غشایی بوده و از فناوری پلاروگرافی برای تعیین میزان اکسیژن محلول استفاده می‌کنند. اکسیژن از طریق غشا عبور می‌کند و در کاتد که دارای پتانسیل مشخص و ثابت شده‌ای است، احیا می‌شود. جریان احیای

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

اندازه‌گیری‌شده متناسب با فشار جزئی اکسیژن (میزان اکسیژن محلول) است. این حسگر دارای صحت بسیار بالا و حد تشخیص بسیار کم بوده و میزان اکسیژن محلول از ppb ۰/۱ تا حد اشباع را اندازه می‌گیرد. غشاء مورداستفاده بسیار پایدار بوده و بنابراین نگهداری این حسگر بسیار آسان است.



شکل ۳-۱۵ حسگر پلاروگرافی [۱۰۵]

۳ ۲ ۱۲ ۳ حسگرهای نوری تعیین میزان اکسیژن محلول

این حسگرها امکان اندازه‌گیری سریع و دقیق اکسیژن را فراهم می‌کنند. صحت اندازه‌گیری از طریق فلورسانی فرونشانی[1] تأمین می‌شود که در نتیجه یک انتقال انرژی بین مولکول اکسیژن و یک کروموفور فلورسانی است. روش نگهداری این حسگرها به دلیل طراحی بدون الکترولیت (الکترود حالت جامد[2]) بسیار راحت است. به علاوه کاربرد این نوع حسگر در شرایط نیروگاهی باعث نمی‌شود تا آلودگی از بدنه حسگر وارد آب شود [۱۰۵].

کاربرد و نوع اندازه‌گیری آهن کل[3]

1 Fluorescence quenching
2 Solid state electrode (SSD)
3 Total Iron

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

آهن به‌صورت اکسیدهای موجود در طبیعت یا در ترکیب با سیلیسیوم و گوگرد وجود دارد. غلظت آهن محلول در آب‌های سطحی کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر (۱ ppm) است، درحالی‌که در آب‌های زیرزمینی غلظت بیشتر است. مطابق استاندارد ملی آب آشامیدنی ثانویه، غلظت آهن باید ۰،۳ میلی‌گرم بر لیتر (۰،۳ ppm) باشد. اگر غلظت آهن بیشتر از ۰،۳ ppm باشد، به آب طعم نامطبوع داده و باعث ایجاد لک می‌شود. غلظت زیادتر آهن در آب‌های سطحی می‌تواند نشان‌دهنده وجود پساب‌های صنعتی یا دورریز کارخانجات باشد.

آلودگی آهن در شورابه‌های میادین نفتی معمولاً در نتیجه فرایندهای خوردگی وسایل و تجهیزات فلزی آهن‌دار موجود در خط تولید است. تجمع نمک‌های آهن نامحلول در شورابه‌ها می‌تواند باعث آسیب قابل‌توجهی به تجهیزات استخراج نفت شده و در نتیجه بهره‌وری یک چاه نفت را به شدت کم کند. بنابراین، اندازه‌گیری کمّی آهن کل در شورابه‌های میادین نفتی بسیار مهم است. از طرفی اندازه‌گیری آهن در آب مورداستفاده در چرخه خنک‌کن نیروگاه‌های حرارتی و همچنین سوخت مورداستفاده در نیروگاه به دلیل جلوگیری از میزان خوردگی و رسوبات اهمیت ویژه‌ای دارد. بدین‌ترتیب، اندازه‌گیری آهن محلول و آهن کل در آب‌ها، پساب‌های صنعتی و شورابه‌های میادین نفتی توسط آنالایزرهای سنجش آهن سریع و دقیق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

آهن موجود در نمونه به‌صورت Fe^{+2} (فرو) و Fe^{+3} (فریک) می‌تواند وجود داشته باشد. اندازه‌گیری آهن بر اساس آهن دوظرفیتی یا فرو است. در روش رنگ‌سنجی با ارتوفنانترولین می‌توان فرو و آهن کل (Total Iron) را تعیین کرد و در نتیجه Fe^{+3} (فریک) را می‌توان به‌دست آورد.

$$\text{Total Iron} = [Fe^{+2}] + [Fe^{+3}] \quad \text{as ppm}$$

برای تعیین آهن کل Total Iron باید Fe+3 نمونه به Fe+2 احیا کرد که از هیدروکسید آمین هیدروکلرید (NH_2OH , HCl) استفاده می‌شود. اگر فاصله نمونه‌برداری و آزمایش زیاد باشد (۲۴ ساعت)، برای جلوگیری از نشت آهن از HCl یا HNO_3 غلیظ استفاده می‌کنند که برای یک لیتر نمونه یک میلی‌لیتر اسید کلریدریک یا اسید نیتریک غلیظ کافی است. PH محلول به زیر ۴ تغییر کند. لازم به یادآوری است در گزارش آنالیز باید صاف شدن یا صاف نشدن نمونه قید شده و در صورت صاف کردن نمونه باید قطر سوراخ‌های کاغذ صافی (Pore Size) مشخص شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

PH نمونه برای اندازه‌گیری آهن باید بین ۳/۵–۲/۹ باشد. برای تنظیم PH نمونه معمولاً از بافر استات (۳/۵–۲/۹) استفاده می‌کنند. در صورت اسیدی کردن نمونه برای حمل آب می‌توان برای تنظیم PH از آمونیم استفاده کرد.

بنابراین روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آهن کل، فرو و فریک موجود در نمونه وجود دارد.

۳-۱۲-۳- استفاده از ماده ۱۰- فنانترولین (آهن کل و محلول)

با این روش می‌توان آهن کل و محلول یا آهن کل و آهن فرو را اندازه‌گیری کرد. در این روش آهن (II) یا آهن فرو با معرف ۱، ۱۰- فنانترولین واکنش کرده و یک کمپلکش کلات نارنجی رنگ ایجاد می‌شود. برای اندازه‌گیری آهن کل، پیش از افزایش واکنشگر ۱، ۱۰- فنانترولین، با افزودن تیوگلیکولیک اسید یا هیدروکسیل آمین هیدرو کلرید، آهن (III) یا آهن فریک به آهن فرو کاهیده می‌شود. فرمولاسیون این واکنشگر مزاحمت‌های ناشی از فلزات مختلف را به حداقل می‌رساند. نتایج اندازه‌گیری آهن برحسب میلی‌گرم بر لیتر یا ppm بیان می‌شود.

۳-۱۲-۴- روش آهن کل (PDTS)

در این روش که به نام روش رنگ‌سنجی کمتریکس[1] برای اندازه‌گیری آهن شناخته می‌شود، از تیوگلیکولیک اسید برای حل کردن ذرات معلق آهن و کاهش آهن فریک به آهن فرو استفاده می‌شود. سپس آهن فرو با معرف PDTS (3-(2-pyridyl)-5,6-bis(4-phenylsulfonic acid)-1,2,4-triazine disodium salt) در محلول اسیدی برای تشکیل کلات قهوه‌ای متمایل به بنفش، واکنش می‌دهد. نتیجه برحسب میلی‌گرم بر لیتر یا ppm بیان می‌شود.

۳-۱۲-۵- روش تیوسیانات فریک (آهن در شورابه‌ها)

برای اندازه‌گیری آهن در شورابه‌ها به‌ویژه در میادین نفتی از شیمی تیوسیانات فریک استفاده می‌شود. در محیط اسیدی، هیدروژن پراکسید یا آب اکسیژنه آهن فرو را به آهن فریک اکسید می‌کند. سپس، آهن فریک حاصل با آمونیوم تیوسیانات واکنش داده و

1 CHEMetrics colorimetric method

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

کمپلکس قرمز- نارنجی تیوسیانات آهن تشکیل می‌شود، که غلظت آن با غلظت آهن متناسب است. نتایج برحسب میلی‌گرم بر لیتر یا ppm بیان می‌شود، که با تقسیم به دانسیته شورابه، به میلی‌گرم بر کیلوگرم، تبدیل می‌گردد [۱۰۶].

۳-۱۳- حسگر سنجش سیلیکا

طراحی‌های نوین نیروگاه‌های حرارتی موجب امکان کار سیستم در دما و فشار بالاتر شده و افزایش بازدهی نیروگاه‌ها را ضمن کاهش مصرف سوخت موجب شده است. کارکرد مؤثرتر سیستم نه تنها کارکرد بهینه نیروگاه را موجب می‌شود بلکه باعث کاهش مصرف سوخت شده و به ازای هر ۱٪ افزایش بهره‌وری باعث ۳٪ کاهش در تولید گاز دی‌اکسید کربن می‌گردد.

در راستای افزایش بهره‌وری نیروگاه‌ها اندازه‌گیری و پایش مداوم سیلیکا باعث کاهش میزان خرابی و عدم کارکرد سیستم شده و هزینه‌های راه‌اندازی مجدد سیستم را کاهش می‌دهد.

۳-۱۳-۱- اثرات سیلیکا

بعد از اکسیژن، سیلیکون دومین فراوانی را در دنیا داراست. سیلیکون به میزان مشخصی در تمام منابع آب طبیعی به‌صورت سلیکون محلول و یا قطعات معلق وجود دارد. دی‌اکسید سیلیکون یا همان سیلیکا یک ترکیب شیمیایی است که در اثر ترکیب سیلکون با اکسیژن با فرمول SiO_2 به‌وجود می‌آید.

به دلیل قابلیت حل بالا، سیلیکا نقش مهمی را در چرخه بخار نیروگاه‌ها ایفا می‌کند. به همین دلیل سیلیکا بر روی تمام سطوحی که بخار از آن عبور می‌کند نشسته و موجب کاهش بهره‌وری و ایمنی سیستم می‌شود.

۳-۱۳-۲- پایش سیلیکا

در چرخه بخار، سلیکا یک لایه‌ی شیشه‌ای بر روی سیستم ایجاد می‌کند که موجب از بین رفتن راندمان فرایند حرارتی می‌شود. در اثر تماس بخار با پره‌های سیستم، لایه‌ای از سیلیکا بر روی آن رسوب کرده و باعث خارج شدن سیستم از بالانس و در شرایط حاد باعث تخریب سیستم می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

سال‌ها تجربه در این صنعت همراه با تحقیقات انجام‌شده میزان قابل‌قبول سیلیکا در نیروگاه‌های حرارتی بر اساس فشار حاصله از بویلرها را به‌دست آورده است. برای مثال در یک سیستم عملیاتی با فشار ۲۶۰۰psi، آب بویلر نباید بیش از ۱۰۰ppbسیلیکا در ورودی باشد تا در نتیجه بیش از ۵ppb سیلیکا در بخار آب ایجاد نشود.

هیچ سیستمی نمی‌تواند ۱۰۰٪ ناخالصی را حذف کند و در نتیجه بخار و آب جایگزین‌شده در بویلر باعث افزایش غلظت مواد جامد محلول به‌خصوص سیلیکا می‌شود. این مسئله خصوصاً هنگامی بیشتر اثرگذار است که بویلر به‌صورت یک‌مرحله‌ای آب را به بخار تبدیل می‌کند، در این حالت امکان خارج کردن ناخالصی‌ها وجود ندارد و اهمیت آن از سایر انواع بویلر با اهمیت‌تر است [۱۰۷].

۳-۱۳-۳- پایش سیلیکا برای حذف مواد Demineralization

علاوه بر اهمیت سیلیکا در بویلرها و چرخه آب آن، پایش سیلیکا برای عملیات Demineralization نیز بسیار حائز اهمیت است. Demineralization روشی مؤثر برای حذف جامدات محلول مانند سیلیکا با استفاده از آنیون‌ها یا مبدل یون بستر مخلوط است.

۳-۱۳-۴- دستگاه سنجش سیلیکا شرکت WALTRON

شرکت والترون با سال‌ها سابقه در سیستم‌های آنالیز آب دارای سیستم‌های سنجش عناصر مختلف ازجمله سیلیکا است. برای اندازه‌گیری سیلیکا روش موردکاربرد، کلرومتریک بوده و با قابلیت یک یا دو ورودی برای نمونه‌برداری از آب است. این سیستم‌ها به‌طور Online قابلیت اندازه‌گیری سیلیکا را دارند.

۳-۱۴- پایش پیوسته کیفیت سوخت نیروگاه‌ها

در نیروگاه‌های حرارتی که با سوخت‌های فسیلی کار می‌کنند، خصوصیات سوخت اعم از ارزش حرارتی، میزان ناخالصی موجود در سوخت و غیره اثر بسیار مهمی بر روی راندمان تولید، کمیت آلاینده‌های خروجی و نوع آلاینده‌های هوا که در طول احتراق تولید

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

می‌شوند، دارد. تغییرات کیفیت سوخت در طول زمان موجب تغییرات آشکاری در کارایی سیستم‌های احتراق خواهد شد. به‌عنوان مثال تغییر ارزش حرارتی سوخت مصرفی در نیروگاه ممکن است باعث کاهش راندمان و یا ایجاد خوردگی در قسمت‌های مختلف نیروگاه شود. به همین منظور، پایش وضعیت و کنترل کیفیت سوخت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

مهم‌ترین سوخت‌هایی که در مصارف نیروگاهی کاربرد دارند به ترتیب اولویت عبارت‌اند از:

- گاز طبیعی
- مازوت (نفت کوره)
- گازوئیل
- زغال‌سنگ

گاز طبیعی ترکیبی از هیدروکربن‌هاست که از چاه‌های گاز و یا به همراه تولید نفت خام به‌دست می‌آید. گاز طبیعی اساساً از متان تشکیل شده و بسته به محل جغرافیایی چاه گاز، مقدار متان موجود در آن بین ۸۰ تا ۹۸ درصد متغیر است (گاز طبیعی ایران به‌طور متوسط دارای حدود ۹۶/۵ درصد متان است)؛ بنابراین خواص آن گاز بسیار مشابه با گاز متان است. بدین‌ترتیب، پایش پیوسته سوخت گازی در نیروگاه به دلیل شناخت بهتر از رفتار سوخت اهمیت ویژه‌ای دارد.

۳-۱۴-۱- روش مرجع سنجش اجزای موجود در گاز طبیعی

کروماتوگرافی گازی[1] یکی از روش‌های کروماتوگرافی است و برای بررسی و جداسازی مواد فرار بدون تجزیه شدن آنها به‌کار می‌رود. در کروماتوگرافی گازی ستون‌ها در دو نوع پرشده[2] و موئین[3] وجود دارند. معمولی‌ترین ستون مورداستفاده را می‌توان ستون DB-1 از شرکت Agilent نام برد که نوعی ستون دارای فاز ساکن غیر قطبی و دارای تحمل دمایی بالا است. این ستون به‌منظور سنجش‌های عمومی مانند آنالیز گاز طبیعی، هیدروکربن‌های سنگین‌تر (در صورت وجود هیدروکربن‌های بسیار سنگین مانند C_{16} یا بالاتر از دو ستون قطبی پشت سر هم استفاده می‌شود که تاکنون فقط در پژوهشگاه نیرو انجام شده است)، حشره‌کش‌ها، اسیدهای چرب، آروماتیک‌ها، هالوکربن‌ها استفاده می‌شود.

1 Gas Chromatography
2 Packed Column
3 Capillary Column

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

روش مرجع سنجش اجزای موجود در گاز طبیعی مطابق استاندارد ASTM D1945 و GPA 2268 انجام می‌شود. این روش آزمون تعیین ترکیبات شیمیایی گاز طبیعی و مخلوط گازهای مشابه را پوشش می‌دهد. این روش آزمون می‌تواند برای تجزیه‌وتحلیل گازهای طبیعی سبک حاوی مقادیر ناچیز هگزان و هیدروکربن‌های بالاتر باشد.

روش‌ها و تجهیزات جدیدی به‌منظور پایش برخط و آنلاین هیدروکربن‌های گازی و سوخت نیروگاه‌ها ارائه شده که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد.

۳-۱۴-۲- آنالایزر گاز طبیعی Micro GC

آنالیزور Agilent Micro GC به‌صورت انجام آزمون برخط و در محل است که در حین انجام آزمایش به‌سرعت داده‌ها را ارائه می‌دهد. امکانات این آنالیزور عبارت‌اند از:

- قابلیت اتصال با سخت‌افزار و نرم‌افزار Micro GC برای انجام سریع آزمون‌ها
- فناوری هم‌دمایی که اجازه می‌دهد عملیات پی در پی و سریع انجام شود
- سیستم یکپارچه که به‌کاربر امکان تجزیه‌وتحلیل ترکیبات مایع را می‌دهد

مزایا: کنترل دقیق دما و تزریق دقیق به‌علاوه افزایش کنترل پنوماتیک الکترونیکی (EPC)[1] برای بهترین زمان نگهداری از نقاط قوت این دستگاه است. به همین ترتیب، Micro GC 490 برای برنامه‌های کاربردی به‌کار گرفته شده است. توانایی آن برای فراهم آوردن نتایج در زمان ۳۰ ثانیه اجازه می‌دهد تا مهندسان زمین‌شناسی و نفت تصمیم‌های سریع و دقیق در روند بهینه‌سازی بگیرند. افزون‌براین، کارشناسان Agilent همچنان به‌طور فعال در ASTM شرکت می‌کنند که منبع قابل‌اعتماد دنیا برای توسعه استانداردهای آنالیز است. قابل‌نصب بودن این دستگاه‌ها روی خطوط انتقال گاز و پایش برخط و در محل از نکات بسیار کلیدی آن است که امروزه از موارد بسیار مهم در صنایع به‌شمار می‌رود.

1 Electronic Pneumatic Control

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۴-۳- آنالیزور GC Portable

در این نوع از دستگاه‌های آنالیز، قابل‌حمل بودن دستگاه از نکات بسیار حائز اهمیت است. ستون مورداستفاده در این دستگاه ستون میکروی موئین بوده و به‌منظور شناسایی از آشکارسازهای میکرو نیز استفاده می‌شود. این دستگاه دارای سیستم پیش‌تغلیظ‌کننده میکرو[1] و ستون میکرو [2](8600-WB1A 15M x 0.53mm I.D. 5.0u DB-1 Type MXT-1 Capillary Column Column) و همچنین آشکارساز PID[3] است. در برخی از مکان‌ها به دلیل گران بودن هزینه‌های آزمایش و یا حمل نمونه به محل آزمایشگاه، از دستگاه‌های پرتابل استفاده می‌شود. این دستگاه که می‌تواند مجهز به آشکارسازهای مختلف و گوناگونی باشد، بر اساس استانداردهای آنالیز گاز تهیه شده و در محل نمونه‌برداری مورداستفاده قرار می‌گیرد. ابعاد این دستگاه ۳۰ *۲۰ *۴۰ سانتی‌متر مکعب است که به‌راحتی قابل‌حمل است [۱۰۸].

۳ ۱۴ ۳ ۱ مزایا:

- قابلیت حمل، آنالیز و نمونه‌برداری در محل
- سرعت آنالیز و تصمیم‌گیری در زمان کوتاه
- در نسخه‌های مختلف با آشکارسازهای مختلف
- مطابق استانداردهای روز دنیا مانند ASTM D3612 (مربوط به آنالیز روغن‌ها و مواد نفتی) و IEC 60567 (مربوط به نمونه‌برداری از نمونه‌های نفتی و روغن‌ها) طراحی و ساخته شده است
- تزریق نمونه به‌صورت خودکار
- دارای حساسیت بالا با مکانیسم خلأسازی
- انتخاب‌پذیری بالا در کروماتوگرافی گازی
- تشخیص طیف‌های مختلف از ترکیبات موجود در گاز طبیعی تا C_{11}
- ضد آب و اثرات رطوبت هوا بر نمونه‌برداری و انجام آزمون در تعداد بالا

1 micro preconcentrator
2 micro gas chromatographic (GC) column
3 photoionization detector (PID)

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۵- مفاهیم ماشین لرنینگ[1] در پردازش داده حسگرها

«یادگیری ماشین» (ML) از روش‌های «هوش مصنوعی[2]» (AI) است که به سیستم توانایی یادگیری خودکار و بدون برنامه‌ریزی صریح را می‌دهد. به عبارت دیگر، هدف در ماشین لرنینگ ساخت ماشین‌های هوشمندی است که با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها و تجربیات، به یادگیری بپردازند. هدف اصلی ماشین لرنینگ طراحی و توسعه برنامه‌های هوشمندی است که بتوانند به داده‌ها دسترسی پیدا کنند و از آنها برای یادگیری استفاده کنند. ازاین‌رو به‌کارگیری یادگیری ماشین در نیروگاه‌های مولد انرژی می‌تواند در دو بخش بهینه‌سازی در تولید و همچنین افزایش راندمان کمک شایانی داشته باشد.

پیش‌بینی میزان برق خروجی نیروگاه به‌منظور به حداکثر رساندن سود حاصل از مگاوات ساعت تولیدی نیروگاه بسیار مهم است. از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین به‌منظور توسعه یک مدل پیش‌بینی استفاده می‌شود، که می‌تواند میزان برق خروجی یک نیروگاه سیکل ترکیبی را در حالت بار کامل پیش‌بینی کند. این روند تحت تأثیر چهار پارامتر اصلی قرار دارد که به‌عنوان متغیرهای ورودی (مؤثر بر راندمان نیروگاه) در مجموعه داده استفاده می‌شوند، دمای محیط، فشار اتمسفر، رطوبت نسبی، کیفیت سوخت و فشار بخار خروجی از اگزوز پارامترهای مهم مورداستفاده در این پردازش‌ها به‌شمار می‌روند.

بنابراین، در حوزه انرژی از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استفاده‌های فراوانی صورت می‌گیرد که از جمله آنها عبارت‌اند از:

- پیش‌بینی خطا در عملکرد سیستم‌ها و دستگاه‌ها و اقدام به تعمیر و نگهداری به موقع آنها؛
- بهینه کردن سرمایه‌گذاری در انرژی؛
- افزایش بهره‌وری انرژی؛
- پیش‌بینی بهتر از مصرف انرژی؛
- تجارت در بازار انرژی؛
- کنترل مصرف‌کنندگان انرژی؛

1 Machine Learning
2 Artificial Intelligence

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

به‌طورکلی می‌توان گفت که ماشین لرنینگ امکان تجزیه و تحلیل مقادیر حجیمی از داده‌ها را فراهم می‌کند. امروزه، ماشین لرنینگ در اکثر صنایع و کسب و کارها مورداستفاده قرار می‌گیرد و تصمیمات بسیار تأثیرگذار دنیای امروز بر اساس پردازش‌های انجام‌شده روی داده‌ها و نتایج حاصل از آنها اتخاذ می‌شود. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری درزمینه‌ی یادگیری ماشین به وقوع پیوسته است. به‌طورکلی باید گفت که این علم، چشم‌اندازی جذاب و جالب توجه را در ذهن جهانیان ایجاد کرده است.

۳-۱۶- کاربرد فیبرهای نوری در ساخت حسگرهای سنجش ولتاژبالا

حسگرهای فیبر نوری به دلیل ویژگی‌های بارز آنها از جمله طبیعت دی‌الکتریک، مصونیت در برابر تداخل الکترومغناطیسی و اندازه و وزن کوچک، برای کاربردهای محیط‌های با ولتاژ بالا صنعت برق بسیار موردتوجه است. حسگرهای فیبر نوری دارای چندین مزیت ذاتی نسبت به تکنیک‌های سنجش معمولی هستند که به‌ویژه در محیط‌های مهم و بدون وجود شرایط سنجش پارامترها اهمیت زیادی پیدا می‌کنند. یک حوزه خاص موردعلاقه برای این نوع حسگرها صنعت برق است که در آن اندازه‌گیری‌ها باید بر روی پتانسیل‌های با فشار قوی و تحت شرایط دارای تداخل الکترومغناطیسی بالا انجام شود. حسگرهای فیبر نوری به‌طور ایدئال با چنین کاربردهایی سازگار هستند؛ زیرا از مواد غیر رسانا تشکیل شده‌اند و سیگنال‌های آنها به‌راحتی در اختلافات زیاد در پتانسیل الکتریکی منتقل می‌شود.

در پست‌های فشار قوی، مهم‌ترین وظایف سنجش اندازه‌گیری جریان و ولتاژ برای اندازه گیری درآمد و همچنین کنترل و حفاظت از پست است. ازاین‌رو، سایز کوچک و وزن کم حسگرهای نوری یک مزیت دیگر است و ادغام حسگرها را در سایر تجهیزات فشار قوی مانند قطع‌کننده مدار و بوش‌ها ممکن می‌سازد. در نتیجه می‌تواند باعث کاهش هزینه و افزایش دقت قابل‌توجهی در سیستم‌های نیروگاه به‌ویژه سنجش قسمت‌های ولتاژ بالا باشد.

۳-۱۷- کاربرد حسگرهای فیبر نوری در سنجش میدان‌های الکتریکی قوی

برای اندازه‌گیری میدان الکتریکی قوی در نیروگاه‌های مولد برق، ولت‌مترهای الکتریکی سنتی با خطر خرابی در ولتاژ بالا و شوک الکتریکی روبه‌رو هستند و باید تکنیک‌های جدیدی برای اندازه‌گیری میدان الکتریکی قوی استفاده شود. حسگرهای فیبر نوری بر

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

اساس اثر Pockel نقش مهمی در این زمینه تحقیقاتی ایفا کرده‌اند. در این نوع حسگرها، امواج نوری شدت یا قطبش است که توسط اثر Pockel هنگام عبور از کریستالی مانند نیوبات لیتیوم تعدیل می‌شود. این نوع حسگرها از بروز مشکلات و معایب ولت‌مترهای الکتریکی سنتی جلوگیری می‌کنند اما آنها نیاز به کریستال‌هایی دارند که به‌عنوان تعدیل‌کننده عمل کنند. بنابراین سیستم کاربرد این نوع حسگر بسیار پیچیده است و نیاز به هماهنگی دقیق در حسگر و میدان الکتریکی موردنظر دارد. نکته حائز اهمیت در استفاده از این نوع حسگرها مقاومت دمایی مواد مورداستفاده در حسگر است. بنابراین، استفاده از کریستال‌های مقاوم در برابر میدان الکتریکی و دمای بالا بسیار اهمیت دارد [۱۰۹].

۳-۱۸- حسگرهای نوین سنجش جریان اتوماتیک ذخیره‌سازها

در مدارات الکترونیک به‌ویژه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند منبع تغذیه و باتری‌ها نیاز به اندازه‌گیری جریان، همواره اهمیت ویژه‌ای دارد. برای اندازه‌گیری جریان راه‌های متفاوتی وجود دارد که یکی از بهترین راه‌ها استفاده از آیسی اندازه‌گیری جریان است. این آیسی می‌توانند تا چند صد آمپر را اندازه‌گیری کنند و همچنین می‌توانند جریان AC و DC را اندازه بگیرند. از طرفی، سنجش مداوم و دقیق این جریان به‌منظور شناخت طول عمر و عملکرد باتری‌ها در رأس اهمیت قرار دارد. ازاین‌رو استفاده از حسگرهای پایش جریان به‌منظور پایش لحظه‌ای و اتوماتیک ذخیره‌سازهای انرژی بسیار موردتوجه قرار گرفته است.

۳-۱۹- حسگرهای لیزری نوین در فرایند کنترل شیمیایی نیروگاه‌ها

همه‌ی اجسام از خود اشعه مادون قرمز ساطع می‌کنند که میزان و شدت این اشعه با دمای جسم متناسب است. حسگرهای لیزری نوین به آسانی همه‌ی اشعه‌های مادون قرمز را به‌صورت تبدیلی از دما نشان می‌دهد. ترمومترهای لیزری برای نشانه‌گذاری روی اجسام داغ به بیم یا شعاع نوری از لیزر نیاز دارند که مثل تفنگ به سمت هدف یا هدف داغ نشانه روی می‌کند برای همین آنها را ترمومتر تفنگی و یا ترمومتر لیزری می‌نامند. بنابراین کاربرد لیزر در ترمومتر لیزری برای اندازه‌گیری دما نیست. در واقع ترمومتر لیزری برای تعیین کردن گستره‌ی دمایی روی اجسام استفاده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

۳-۱۹-۱- مزایای حسگرهای لیزری دمایی

- حسگرهای لیزری اندازه‌گیری دما را به‌صورت غیر تماسی انجام می‌دهند، همچنین مناسب و ایمن هستند.
- حسگرهای لیزری قابلیت اندازه‌گیری دمای اجسام در حال حرکت را دارند.
- حسگرهای لیزری قابلیت اندازه‌گیری دما از فاصله‌ی زیاد را دارند
- بالا بودن سرعت پاسخ‌دهی در حسگرهای لیزری

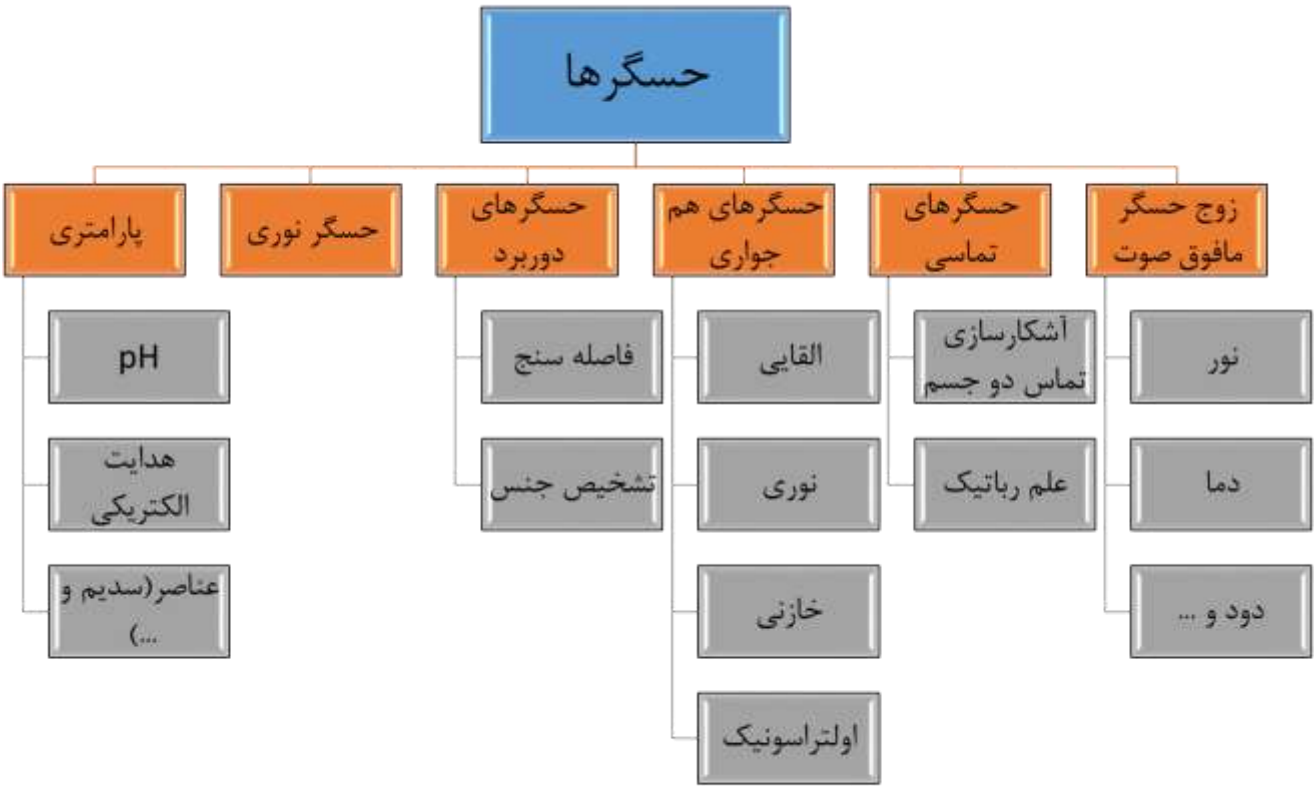
با توجه به نوع استفاده از این حسگرها، دقت دستگاه، رنج دمایی و قدرت تشخیص بر اساس فاصله در انتخاب این نوع حسگرها اهمیت بالایی دارد.

۳-۲۰- جمع‌بندی

کنترل و پایش مشخصه آب، بخار، سوخت و روغن در نیروگاه‌های حرارتی به دلیل بهبود عملکرد نیروگاه و اطلاع از نحوه روند تولید اهمیت بالایی دارد. بنابراین، استفاده از روش‌های مختلف برای پایش در طول زمان بهره‌برداری از نیروگاه به‌کار گرفته‌شده است. استفاده از حسگرها، یکی از انواع این روش‌هاست که با توجه به نوع نیاز به‌صورت‌های مختلف طراحی شده و به‌کار گرفته می‌شوند. ازاین‌رو، دقت عمل، سرعت، قابلیت ثبت نتایج و غیره از پارامترهای مهم طراحی و استفاده از حسگر است.

استفاده از علم الکتروشیمی به‌منظور بهبود کیفیت حسگرهای مورداستفاده در نیروگاه‌ها، به‌عنوان روشی مطلوب در نظر گرفته شده است. این نوع حسگرهای الکتروشیمی با ترکیب برخی تکنولوژی‌ها مانند نانو، پلیمر، مواد و غیره قابلیت اندازه‌گیری در بازه مناسب و تحمل دمایی بالاتری داشته و امروزه به‌عنوان روش‌های بسیار مناسب کنترل کیفیت در نیروگاه‌ها و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارند. همچنین درخت فناوری مربوط به شناسایی انواع حسگرهای کاربردی در نیروگاه‌ها در شکل ۳-۱۶ ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.144



شکل ۳-۱۶ درخت فناوری مربوز به حسگرهای کاربردی در صنعت برق

۳-۲۱- پروژه‌های پیشنهادی در حوزه حسگرها

در راستای حسگرها و کاربرد آنها در صنعت برق و به‌طور ویژه نیروگاه‌ها مقالات و گزارش‌های بسیاری به چاپ رسیده است. عمده‌ی کاربرد حسگرها در صنعت برق در جایگاه تولید انرژی الکتریکی و نیروگاه‌ها است. استفاده اصلی حسگرها در فرایندهای کنترل شیمیایی چرخه آب–بخار نیروگاه‌های حرارتی است. حسگرها در دسته گسترده‌ای از حسگرهای کنترل حرارت، pH، هدایت

DOI: 10.30503/nripress.2020.144

گرفته تا حسگرهای سنجش اکسیژن، سدیم، آهن، مس، .... در این صنعت کاربرد دارند. کنترل و سنجش شرایط آب و بخار در کنترل شیمیایی نیروگاه‌های حرارتی از گذشته تاکنون از درجه اهمیت بالایی برخوردار است به‌گونه‌ای که همواره این تکنولوژی در حال بهبود و رو به توسعه است. دسته بزرگی از سنسورها نیز در صنعت برق به‌منظور پایش و کنترل کیفیت سوخت نیروگاه‌ها و بررسی پارامترهای کلیدی روغن ترانسفورماتور نیز به‌کار گرفته می‌شوند. فهرستی از پروژه‌های کاربردی در این حوزه به شرح ذیل بر اساس الویت آورده شده است.

۱. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر لومینسانس در صنعت برق
۲. بررسی و ارائه مفاهیم ماشین لرنینگ در پردازش داده حسگرهای کنترل شیمیایی نیروگاه‌ها (Machine Learning Chemical Control Sensor)
۳. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر القایی در صنعت برق
۴. کاربرد فیبرهای نوری در ساخت حسگرهای سنجش ولتاژ یالا در صنایع نیروگاهی (Optical Fiber Sensors)
۵. کاربرد حسگرهای فیبر نوری در سنجش میدان‌های الکتریکی قوی (Optical Fiber Electric Field Sensor)
۶. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر سنجش سدیم
۷. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر سنجش اکسیژن
۸. ارائه جزئیات حسگرهای نوین سنجش جریان به‌منظور چک کردن اتوماتیک سیستم‌های ذخیره‌ساز (Current Sensor Solutions for Automotive Battery Monitoring)
۹. استفاده از حسگرهای لیزری نوین در فرایند کنترل شیمیایی مانند لیزرهای سنجش دما (Laser Power Sensor for Process Control)
۱۰. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر خازنی در صنعت برق
۱۱. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر مغناطیسی در صنعت برق
۱۲. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگرهای ثبت گاز خروجی ثابت و پرتابل
۱۳. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر سنجش pH
۱۴. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر سنجش هدایت با مکانیسم‌های نوین
۱۵. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد آهن مجموع (Free and Total Iron)
۱۶. ارائه تعاریف، ساختار و مکانیسم عملکرد، اساس کار و کاربرد حسگر سنجش سیلیکا
۱۷. ارائه تعاریف مربوط به حسگر پایش پایش پیوسته کیفیت سوخت نیروگاه‌ها (Continuous Monitoring Fuel Gas Quality)

فصل ۴ مراجع

1. Miller, J.R., *Engineering electrochemical capacitor applications.* Journal of Power Sources, 2016. **326**: p. 726-735.

2. Martynyuk, V. and M. Ortigueira, *Fractional model of an electrochemical capacitor.* Signal Processing, 2015. **107**: p. 355-360.

3. Miller, J.R. and A. Burke, *Electrochemical capacitors: challenges and opportunities for real-world applications.* The electrochemical society interface, 2008. **17**(1): p. 53.

4. Kötz, R. and M. Carlen, *Principles and applications of electrochemical capacitors.* Electrochimica acta, 2000. **45**(15-16): p. 2483-2498.

5. Simon, P. and Y. Gogotsi, *Materials for electrochemical capacitors.* Nanoscience and technology: a collection of reviews from Nature journals, 2010: p. 320-329.

6. Miller, J.R. and P. Simon, *Electrochemical capacitors for energy management.* Science Magazine, 2008. **321**(5889): p. 651-652.

7. Koryta, J., P. Vanýsek, and M. Březina, *Electrolysis with electrolyte dropping electrode: II. Basic properties of the system.* Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry, 1977. **75**(1): p. 211-228.

8. Abruna, H.D., Y. Kiya, and J.C. Henderson, *Batteries and electrochemical capacitors.* Phys. Today, 2008. **61**(12): p. 43-47.

9. Pang, S.-C. and M.A. Anderson, Novel electrode materials for electrochemical capacitors: Part II. Material characterization of sol-gel-derived and electrodeposited manganese dioxide thin films. Journal of Materials Research, 2000. **15**(10): p. 2096-2106.

10. Fang, B. and L. Binder, *A novel carbon electrode material for highly improved EDLC performance.* The Journal of Physical Chemistry B, 2006. **110**(15): p. 7877-7882.

11. Nossol, E. and A.J. Zarbin, A simple and innovative route to prepare a novel carbon nanotube/prussian blue electrode and its utilization as a highly sensitive H2O2 amperometric sensor. Advanced Functional Materials, 2009. **19**(24): p. 3980-3986.

12. Lee, S.W., et al., High-power lithium batteries from functionalized carbon-nanotube electrodes. Nature nanotechnology, 2010. **5**(7): p. 531-537.

13. Reddy, A.L.M., et al., Coaxial MnO2/carbon nanotube array electrodes for high-performance lithium batteries. Nano letters, 2009. **9**(3): p. 1002-1006.

14. Craig, B., et al., *Review of current progress in non-aqueous aluminium batteries.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **133**: p. 110100.

15. Delpuech, N., et al., Mechanism of silicon electrode aging upon cycling in full lithium-ion batteries. ChemSusChem, 2016. **9**(8): p. 841-848.

16. Wu, H., et al., Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid–electrolyte interphase control. Nature nanotechnology, 2012. **7**(5): p. 310-315.

17. Zhang, X., et al., Structure-related electrochemical performance of organosulfur compounds for lithium–sulfur batteries. Energy & Environmental Science, 2020. **13**(4): p. 1076-1095.

18. Cheon, S.-E., et al., Rechargeable lithium sulfur battery: I. Structural change of sulfur cathode during discharge and charge. Journal of the Electrochemical Society, 2003. **150**(6): p. A796.

19. Hao, R., et al., Direct chitin conversion to N-doped amorphous carbon nanofibers for high-performing full sodium-ion batteries. Nano Energy, 2018. **45**: p. 220-228.

20. Conder, J., et al., Chitin and chitosan—structurally related precursors of dissimilar hard carbons for Na-ion battery. ACS Applied Energy Materials, 2019. **2**(7): p. 4841-4852.

21. Mondal, A.K., et al., Naturally nitrogen doped porous carbon derived from waste shrimp shells for high-performance lithium ion batteries and supercapacitors. Microporous and Mesoporous Materials, 2017. **246**: p. 72-80.

22. Rikame, S.S., A.A. Mungray, and A.K. Mungray, Modification of anode electrode in microbial fuel cell for electrochemical recovery of energy and copper metal. Electrochimica Acta, 2018. **275**: p. 8-17.

23. Song, J. and M.Z. Bazant, Effects of nanoparticle geometry and size distribution on diffusion impedance of battery electrodes. Journal of The Electrochemical Society, 2012. **160**(1): p. A15.

24. Wu, H., et al., Engineering empty space between Si nanoparticles for lithium-ion battery anodes. Nano letters, 2012. **12**(2): p. 904-909.

25. Wang, S.M. and S.D. Sekaran, *Graphite Electrode with Best Price and Quality.* The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 2010. **83**(3): p. 690.

26. Qi, Y. and S.J. Harris, *In situ observation of strains during lithiation of a graphite electrode.* Journal of The Electrochemical Society, 2010. **157**(6): p. A741.

27. Kim, U.S., C.B. Shin, and C.-S. Kim, *Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery.* Journal of Power Sources, 2008. **180**(2): p. 909-916.

28. Xiang, J., et al., A novel coordination polymer as positive electrode material for lithium ion battery. Crystal Growth and Design, 2008. **8**(1): p. 280-282.

29. Wu, F., et al., Infiltrated porous polymer sheets as free-standing flexible lithium-sulfur battery electrodes. Advanced Materials, 2016. **28**(30): p. 6365-6371.

30. Mermilliod, N., J. Tanguy, and F. Petiot, *A study of chemically synthesized polypyrrole as electrode material for battery applications.* Journal of the Electrochemical Society, 1986. **133**(6): p. 1073.

31. Killian, J., et al., *Polypyrrole composite electrodes in an all-polymer battery system.* Journal of the Electrochemical Society, 1996. **143**(3): p. 936.

32. Osaka, T., et al., Dependence of film thickness on electrochemical kinetics of polypyrrole and on properties of lithium/polypyrrole battery. Journal of The Electrochemical Society, 1987. **134**(9): p. 2096.

33. Bayaguud, A., et al., Cationic surfactant-type electrolyte additive enables three-dimensional dendrite-free zinc anode for stable zinc-ion batteries. ACS Energy Letters, 2020. **5**(9): p. 3012-3020.

34. Lu, H., et al., Theoretical screening of novel electrode materials for lithium–ion batteries from industrial polymers. Ionics, 2019. **25**(9): p. 4161-4170.

35. Bengoechea, M., et al., Chemical reduction method for industrial application of undoped polypyrrole electrodes in lithium-ion batteries. Journal of power sources, 2006. **160**(1): p. 585-591.

36. Yu, X., et al., Flexible fiber-type zinc–carbon battery based on carbon fiber electrodes. Nano Energy, 2013. **2**(6): p. 1242-1248.

37. Moyer, K., et al., Carbon fiber reinforced structural lithium-ion battery composite: Multifunctional power integration for CubeSats. Energy Storage Materials, 2020. **24**: p. 676-681.

38. Hashemi, T., F. Golestani-Fard, and J. Avanessian, *Dicadmium stannate as a novel electrode material for battery applications.* Journal of the Electrochemical Society, 1987. **134**(7): p. 1591.

39. Yang, B., et al., Organo-sulfur molecules enable iron-based battery electrodes to meet the challenges of large-scale electrical energy storage. Energy & Environmental Science, 2014. **7**(8): p. 2753-2763.

40. Jeon, J.-W., S.R. Kwon, and J.L. Lutkenhaus, Polyaniline nanofiber/electrochemically reduced graphene oxide layer-by-layer electrodes for electrochemical energy storage. Journal of Materials Chemistry A, 2015. **3**(7): p. 3757-3767.

41. Yang, H., et al., Superlithiation of non-conductive polyimide toward high-performance lithium-ion batteries. Journal of Materials Chemistry A, 2018. **6**(42): p. 21216-21224.

42. Alcántara, R., et al., *Carbon black: a promising electrode material for sodium-ion batteries.* Electrochemistry Communications, 2001. **3**(11): p. 639-642.

43. Goriparti, S., M. Harish, and S. Sampath, *Ellagic acid–a novel organic electrode material for high capacity lithium ion batteries.* Chemical Communications, 2013. **49**(65): p. 7234-7236.

44. Kumar, A.S., et al., Electrochemical immobilization of ellagic acid phytochemical on MWCNT modified glassy carbon electrode surface and its efficient hydrazine electrocatalytic activity in neutral pH. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2016. **782**: p. 215-224.

45. Sakuda, A., A. Hayashi, and M. Tatsumisago, Sulfide solid electrolyte with favorable mechanical property for all-solid-state lithium battery. Scientific reports, 2013. **3**(1): p. 1-5.

46. Nie, M., et al., Lithium ion battery graphite solid electrolyte interphase revealed by microscopy and spectroscopy. The Journal of Physical Chemistry C, 2013. **117**(3): p. 1257-1267.

47. Shang, Y., et al., An "Ether-In-Water" Electrolyte Boosts Stable Interfacial Chemistry for Aqueous Lithium-Ion Batteries. Advanced Materials, 2020. **32**(40): p. 2004017.

48. Ye, R., et al., Water-based fabrication of garnet-based solid electrolyte separators for solid-state lithium batteries. Green Chemistry, 2020. **22**(15): p. 4952-4961.

49. Cecchetto, L., et al., Study of a Li–air battery having an electrolyte solution formed by a mixture of an ether-based aprotic solvent and an ionic liquid. Journal of Power Sources, 2012. **213**: p. 233-238.

50. Zhao, Y., et al., Sustainable electrical energy storage through the ferrocene/ferrocenium redox reaction in aprotic electrolyte. Angewandte Chemie, 2014. **126**(41): p. 11216-11220.

51. Wang, Q., et al., *A shuttle effect free lithium sulfur battery based on a hybrid electrolyte.* Physical Chemistry Chemical Physics, 2014. **16**(39): p. 21225-21229.

52. Zhang, W., et al., A durable and safe solid-state lithium battery with a hybrid electrolyte membrane. Nano Energy, 2018. **45**: p. 413-419.

53. Hasvold, Ø., et al., *Sea-water battery for subsea control systems.* Journal of Power Sources, 1997. **65**(1-2): p. 253-261.

54. Lowy, D.A. and B. Mátyás, Sea Water Activated Magnesium-Air Reserve Batteries: Calculation of Specific Energy and Energy Density for Various Cell Geometries. DRC Sustainable Future, 2020. **1**(1): p. 1-6.

55. Verma, V., et al., Chelating Ligands as Electrolyte Solvent for Rechargeable Zinc-Ion Batteries. Chemistry of Materials, 2021. **33**(4): p. 1330-1340.

56. Valøen, L.O. and J.N. Reimers, *Transport properties of LiPF6-based Li-ion battery electrolytes.* Journal of The Electrochemical Society, 2005. **152**(5): p. A882.

57. Liao, Y., et al., Polypropylene-supported and nano-Al2O3 doped poly (ethylene oxide)–poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene)-based gel electrolyte for lithium ion batteries. Journal of Power Sources, 2011. **196**(4): p. 2115-2121.

58. Matios, E., et al., Graphene regulated ceramic electrolyte for solid-state sodium metal battery with superior electrochemical stability. ACS applied materials & interfaces, 2019. **11**(5): p. 5064-5072.

59. Kammoun, M., S. Berg, and H. Ardebili, Flexible thin-film battery based on graphene-oxide embedded in solid polymer electrolyte. Nanoscale, 2015. **7**(41): p. 17516-17522.

60. Gachot, G., et al., Deciphering the multi-step degradation mechanisms of carbonate-based electrolyte in Li batteries. Journal of Power Sources, 2008. **178**(1): p. 409-421.

61. Rohan, R., et al., A high performance polysiloxane-based single ion conducting polymeric electrolyte membrane for application in lithium ion batteries. Journal of Materials Chemistry A, 2015. **3**(40): p. 20267-20276.

62. Xu, M., et al., Investigation of the solid electrolyte interphase on MCMB and NG electrodes in lithium tetrafluorooxalatophosphate [LiPF4C2O4] based electrolyte. Journal of The Electrochemical Society, 2011. **158**(11): p. A1202.

63. Khalifa, M., et al., PVDF/halloysite nanocomposite-based non-wovens as gel polymer electrolyte for high safety lithium ion battery. Polymer Composites, 2019. **40**(6): p. 2320-2334.

64. Gu, S., et al., *A hybrid electrolyte for long-life semi-solid-state lithium sulfur batteries.* Journal of Materials Chemistry A, 2017. **5**(27): p. 13971-13975.

65. Li, S., et al., *Using neural networks to estimate wind turbine power generation.* IEEE Transactions on energy conversion, 2001. **16**(3): p. 276-282.

66. Cooper, J.F. and R. Selman, Electrochemical oxidation of carbon for electric power generation: a review. Ecs Transactions, 2009. **19**(14): p. 15.

67. Landau, U., *Electrochemistry in industry: new directions*. 2012: Springer Science & Business Media.

68. Simonsson, D., *Electrochemistry for a cleaner environment.* Chemical Society Reviews, 1997. **26**(3): p. 181-189.

69. Hudson, J.L. and T. Tsotsis, *Electrochemical reaction dynamics: a review.* Chemical Engineering Science, 1994. **49**(10): p. 1493-1572.

70. Abdollahipour, A. and H. Sayyaadi, A review of thermally regenerative electrochemical systems for power generation and refrigeration applications. Applied Thermal Engineering, 2021: p. 116576.

71. Mei, Y. and C.Y. Tang, Recent developments and future perspectives of reverse electrodialysis technology: A review. Desalination, 2018. **425**: p. 156-174.

72. Bajpai, P. and V. Dash, *Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(5): p. 2926-2939.

73. Mohammed, Y., et al., Renewable energy resources for distributed power generation in Nigeria: a review of the potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 257-268.

74. Zografidou, E., et al., A financial approach to renewable energy production in Greece using goal programming. Renewable energy, 2017. **108**: p. 37-51.

75. Yildiz, Ö., Financing renewable energy infrastructures via financial citizen participation–The case of Germany. Renewable Energy, 2014. **68**: p. 677-685.

76. Appleby, A.J., *Fuel cell handbook.* 1988.

77. O'hayre, R., et al., *Fuel cell fundamentals*. 2016: John Wiley & Sons.

78. McLean, G., et al., *An assessment of alkaline fuel cell technology.* International Journal of Hydrogen Energy, 2002. **27**(5): p. 507-526.

79. Dicks, A.L., *Molten carbonate fuel cells.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004. **8**(5): p. 379-383.

80. Sammes, N., R. Bove, and K. Stahl, *Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications.* Current opinion in solid state and materials science, 2004. **8**(5): p. 372-378.

81. Peighambardoust, S.J., S. Rowshanzamir, and M. Amjadi, *Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications.* International journal of hydrogen energy, 2010. **35**(17): p. 9349-9384.

82. Singhal, S.C., *Advances in solid oxide fuel cell technology.* Solid state ionics, 2000. **135**(1-4): p. 305-313.

83. Emadi, A. and S. Williamson. Fuel cell vehicles: opportunities and challenges. in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. 2004. IEEE.

84. Schalenbach, M., et al., A perspective on low-temperature water electrolysis–challenges in alkaline and acidic technology. Int. J. Electrochem. Sci, 2018. **13**(2): p. 1173-1226.

85. Heinzel, A., B. Vogel, and P. Hübner, *Reforming of natural gas—hydrogen generation for small scale stationary fuel cell systems.* Journal of Power Sources, 2002. **105**(2): p. 202-207.

86. Hamnett, A., Mechanism and electrocatalysis in the direct methanol fuel cell. Catalysis today, 1997. **38**(4): p. 445-457.

87. Zhu, B., *Next generation fuel cell R&D.* International journal of energy research, 2006. **30**(11): p. 895-903.

88. Song, C., Fuel processing for low-temperature and high-temperature fuel cells: Challenges, and opportunities for sustainable development in the 21st century. Catalysis today, 2002. **77**(1-2): p. 17-49.

89. Dyer, C.K., *Fuel cells for portable applications.* Journal of Power Sources, 2002. **106**(1-2): p. 31-34.

90. Lodhi, M., P. Vijayaraghavan, and A. Daloglu, *An overview of advanced space/terrestrial power generation device: AMTEC.* Journal of Power Sources, 2001. **103**(1): p. 25-33.

91. Logan, B.E. and M. Elimelech, *Membrane-based processes for sustainable power generation using water.* Nature, 2012. **488**(7411): p. 313-319.

92. Sanyal, U., et al., *Electrocatalytic hydrogenation of oxygenated compounds in aqueous phase.* Organic Process Research & Development, 2018. **22**(12): p. 1590-1598.

93. Kim, B.H., I.S. Chang, and G.M. Gadd, *Challenges in microbial fuel cell development and operation.* Applied microbiology and biotechnology, 2007. **76**(3): p. 485-494.

94. Ieropoulos, I.A., et al., *Comparative study of three types of microbial fuel cell.* Enzyme and microbial technology, 2005. **37**(2): p. 238-245.

95. Zhu, X., et al., A thermally-regenerative ammonia-based flow battery for electrical energy recovery from waste heat. ChemSusChem, 2016. **9**(8): p. 873-879.

96. Choudhury, A., H. Chandra, and A. Arora, *Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **20**: p. 430-442.

97. Turek, M. and B. Bandura, *Renewable energy by reverse electrodialysis.* Desalination, 2007. **205**(1-3): p. 67-74.

98. Długołęçki, P., et al., *Practical potential of reverse electrodialysis as process for sustainable energy generation.* Environmental science & technology, 2009. **43**(17): p. 6888-6894.

99. Wilson, J.S., *Sensor technology handbook*. 2004: Elsevier.

100. Baxter, L.K., *Capacitive sensors.* Design and Applications, 1997.

101. Lenz, J.E., *A review of magnetic sensors.* Proceedings of the IEEE, 1990. **78**(6): p. 973-989.

102. Korotcenkov, G., *Handbook of gas sensor materials.* Conventional approaches, 2013. **1**.

103. Wencel, D., T. Abel, and C. McDonagh, *Optical chemical pH sensors.* Analytical chemistry, 2014. **86**(1): p. 15-29.

104. Olthuis, W., W. Streekstra, and P. Bergveld, Theoretical and experimental determination of cell constants of planar-interdigitated electrolyte conductivity sensors. Sensors and Actuators B: Chemical, 1995. **24**(1-3): p. 252-256.

105. Tai, H., et al. A review of measurement methods of dissolved oxygen in water. in International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. 2011. Springer.

106. Laglera, L.M. and D. Monticelli, *Iron detection and speciation in natural waters by electrochemical techniques: a critical review.* Current Opinion in Electrochemistry, 2017. **3**(1): p. 123-129.

107. Rao, H., et al., *Mini review: Electroanalytical sensors of mesoporous silica materials.* Analytical Letters, 2013. **46**(18): p. 2789-2812.

108. Bickerstaff, R., et al., *Review of sensor technologies for in-line inspection of natural gas pipelines.* Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2002.

109. Agrawal, G.P., *Fiber-optic communication systems*. Vol. 222. 2012: John Wiley & Sons.